



KYLMÄLAITOKSEEN LIITETTYJEN ENERGIAKAIVOJEN TOIMINTA JA LAUHDELÄMMÖN LATAAMINEN KALLIOPERÄÄN

Uljas Matti

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Insinööri (AMK)

2017

Tekniikan ja liikenteen ala
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Matti Uljas	Vuosi	2017
Ohjaaja	Petri Kuisma		
Toimeksiantaja	Jetitek Oy		
Työn nimi	Kylmälaitokseen liitettyjen energiakaivojen toiminta ja lauhdelämmön lataaminen kallioperään		
Sivumäärä	48		

Opinnäytetyössä tutkittiin pienen myymäläkiinteistön kylmälaitokseen liitettyjä energiakaivoja Rovaniemellä. Tavoitteena oli selvittää, miten käytössä olevien kaivojen lukumäärä vaikuttaa kaivojen toimintaan ja pitääkö kaivojen mitoitusarvo paikkansa. Lisäksi selvitettiin, kuinka pitkään kallioperään ladattu lauhdelämpö säilyy kalliossa eli onko se hyödynnettävissä lisälämmöntuotannossa talven kylmän jakson aikana. Lauhdelämmön lataamista maahan ei ole aikaisemmin juurikaan tutkittu, joten tämä tutkimus antaa tärkeää tietoa maalämmön mahdollisuuksista ja energiatehokkuuden parantamisesta tulevaisuudessa. Työssä perehdyttiin myös maalämpöön, kylmäprosessiin ja energiakaivoihin.

Tutkimuskohteena oleva neljän energiakaivon kokonaisuus on osa Jetitek Oy:n kehittämää nykyaikaista kylmälaitosta. Energiakaivojen toimintaa analysoitiin Excel-taulukkomuodossa olleen aineiston avulla, joka saatiin järjestelmään asennetuilta lämpömittareilta. Aineisto koostui talven, kevään ja kesän mittausjaksoista.

Tämän työn perusteella kylmälaitokseen liitettyjen energiakaivojen lukumäärä vaikuttaa kaivojen lämpötilatasoihin ja toimintaan. Kahdella kaivolla kallioperää ylikuormitetaan eikä energiakaivojen teho riitä laitoksen tarpeisiin kovin pitkäksi aikaa. Kolmella kaivolla vastaavaa ylikuormittumista ei tapahdu, vaan järjestelmä toimii jo lähes optimaalisesti. Neljäs kaivo lisää järjestelmän toimintavarmuutta entisestään. Mitoitusarvo pitää melko hyvin paikkansa, mutta tulevaisuudessa mitoituksessa käytettävää varmuuskerrointa voitaisiin pienentää hieman, sillä laitos toimii hyvin jo kolmella kaivolla. Lauhdelämmön lataaminen maahan osoittautui oletettua kannattavammaksi. Tutkittavissa olosuhteissa kallioperän jäähtymisen takaisin alkuperäiseen lämpötilaan kestää vuosia.

Avainsanat

energiakaivo, kylmäprosessi, lauhde-energia, lauhdelämpö, lämpöpumppu, maalämpö

Technology, Communication and Transport
Civil Engineering Degree Programme
Bachelor of Engineering

Author	Matti Uljas	Year	2017
Supervisor	Petri Kuisma		
Commissioned by	Jetitek Oy		
Subject of thesis	Functioning of Vertical Ground Source Heat Pumps Attached to a Refrigeration Plant and the Geoexchange of Condensation Heat into Bedrock		
Number of pages	48		

The purpose of this study was to assess the functioning of a set of ground source heat pumps attached to the refrigeration plant of a small retail property in Rovaniemi. The aim was to study how the number of active pumps in the geoexchange system affected the overall performance of the system and how well the rated efficiency values coincided with the measured results. Additionally, the dissipation rate of the condensation heat from the plant stored in bedrock was studied.

The geoexchange system comprising a total of four ground source heat pumps is part of the refrigeration plant developed by Jetitek Oy. The performance of the system and the bedrock temperature levels were studied by analyzing a body of data collected from integral thermometers. The data was collected during the winter, spring and summer seasons.

The measurements showed a correlation between the number of pumps and the performance and reliability of the system. However, increasing the number of pumps from three to four resulted in only a relatively slight improvement, which could allow for a smaller safety factor. Furthermore, the dissipation of heat from bedrock appeared slower than hypothesized.

Key words condensation heat, geoexchange, geothermal heat, ground source heat pump, heat pump, refrigerating process

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	MAA- JA KALLIOPERÄN LÄMPÖTILA JA LÄMPÖOMINAISUUDET	9
2.1	Lämpötila maa- ja kallioperässä	9
2.2	Maa- ja kallioperän lämpöominaisuuksia	10
3	MAALÄMPÖ	12
3.1	Maalämpöjärjestelmä yleisesti	12
3.2	Maalämpöpumpun toimintaperiaate	13
3.3	Energiakaivot	14
3.4	Lämmönkeruunesteet	16
4	KYLMÄNTUOTANTO	17
4.1	Kylmäprosessi	17
4.2	Kylmäaineet	19
4.3	Lauhdelämpö ja lämmöntalteenotto	20
4.4	Lauhde-energian lataaminen maahan	21
5	TUTKITTAVAN ENERGIKAIVOJÄRJESTELMÄN ESITTELY	23
5.1	Järjestelmän perustiedot	23
5.2	Kylmäkoneen lauhdutus ja lauhde-energian lataaminen maahan	23
5.3	Lisälämmöntuotanto	24
6	MITTAUKSET	25
6.1	Mittausten tavoite	25
6.2	Mittauskohdat	25
6.3	Mittausjaksot	26
6.4	Mittausten analysointi	27
7	MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU	29
7.1	Talven mittaukset	29
7.1.1	Ulkolämpötila talven mittausjaksolla	29
7.1.2	Energiakaivojen lämpötilaseuranta talven mittausjaksolla	30
7.2	Kevään mittaukset	34
7.2.1	Ulkolämpötila kevään mittausjaksolla	34
7.2.2	Energiakaivojen lämpötilaseuranta kevään mittausjaksolla	34

7.2.3	HE40-lämmönvaihtimen ohitus	38
7.3	Kesän mittaukset	40
7.3.1	Ulkolämpötila kesän mittausjaksolla	40
7.3.2	Lauhdelämmön säilyminen kallioperässä	41
8	POHDINTA	44
	LÄHTEET	47

ALKUSANAT

Kiitän mielenkiintoisesta aiheesta ja avusta opinnäytetyön tekemisessä Jetitek Oy:tä. Kiitos myös Sallille avusta projektin aikana.

1 JOHDANTO

Fossiiliset polttoaineet ovat olleet teollistumisesta lähtien tärkein energiantuotantokeino maapallolla. Fossiiliset polttoaineet eivät kuitenkaan ole ongelmaton energianlähde, sillä niiden polttamisesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt kiihdyttävät ilmastonmuutosta (Climate Change 2013, 15). Ilmastonmuutoksen kiihtyminen aiheuttaa painetta etsiä uusiutuvia, ympäristölle vähemmän haitallisia energianlähteitä.

Maa- ja kallioperään on varastoitunut valtava määrä lämpöenergiaa. Tämä lämpöenergia on peräisin auringon säteilyenergiasta ja syvällä maapallon sisällä syntyvästä geotermisestä lämmöstä (Huusko 2016, 12). Maalämpöä voidaan hyödyntää rakennusten ja käyttöveden lämmittämisessä maalämpöpumpun avulla. Lämpöpumppu ottaa lämpöä alemmasta lämpötilatasosta ja siirtää sitä sähkön avulla korkeampaan lämpötilatasoon. Toisaalta maalämpöjärjestelmää voidaan käyttää lämpimänä aikana myös rakennusten viilentämiseen. Suomessa ollaan maalämmön hyödyntämisessä vielä merkittävästi Ruotsia jäljessä, mutta maalämmön käyttö lisääntyy täälläkin koko ajan (Huusko 2016, 14). Maalämmön käyttöä edistävät sekä energian hinnan nousu että paine siirtyä uusiutuviin energialähteisiin (Juvonen & Lapinlampi 2013, 12).

Uusiutuvien energialähteiden käyttämisen lisäksi on yhtä tärkeää hyödyntää tuotettu energia mahdollisimman tehokkaasti. Kylmälaitosten kylmäprosesseissa vapautuu valtavasti lauhdelämpöä. Usein lauhdelämpöä ei hyödynnetä, vaan se johdetaan ulos kiinteistöstä. Nykyään lämmöntalteenottoon on kuitenkin alettu kiinnittää huomiota. Tässä työssä tutkitaan kylmälaitokseen liitettyjen, maalämpökaivojen toimintaperiaatteella toimivien energiakaivojen hyödyntämistä myymäläkiinteistön lämmittämisessä. Samalla tutkitaan myös sitä, onko myymälän kylmälaitteiden jäähdyttämisessä syntyvää ylimääräistä lämpöenergiaa mahdollista ladata energiakaivojen kautta kallioperään, josta se olisi myöhemmin uudelleenkäytettävissä kiinteistön lämmittämiseen.

Lauhdelämmön lataamista maaperään ei Suomessa ole tutkittu juurikaan, mutta käytännön kokeiluja on tehty. Lataamismahdollisuuden selvittäminen on tärkeää,

sillä menetelmän avulla voitaisiin saavuttaa merkittävää energiansäästöä. Ylimääräinen lauhdelämpö ohjataan useimmiten ulos kiinteistöstä. Tämä energia on kuitenkin energiatehokkuuden kannalta järkevämpää ohjata käyttöön. Lisälämmön lataamisella kallioon olisi mahdollista parantaa maalämpöpumpun tehokkuutta, sillä Suomessa maa- ja kallioperän lämpötila on luontaisesti matala verrattuna eteläisempiin alueisiin.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on kylmä- ja lämmitysjärjestelmiin erikoistunut Jetitek Oy. Tutkimuskohteena ovat Rovaniemen Rantavitikan Salen myymäläkiinteistön kylmälaitokseen liitetyt energiakaivot. Energiakaivoja on yhteensä neljä ja tässä työssä on tutkittu lauhdelämmön lataamisen lisäksi kaivojen lukumäärän vaikutusta kaivojen lämpötilatasoihin ja toimintaan. Mittaukset on tehty vuoden 2016 aikana.

2 MAA- JA KALLIOPERÄN LÄMPÖTILA JA LÄMPÖOMINAISUUDET

2.1 Lämpötila maa- ja kallioperässä

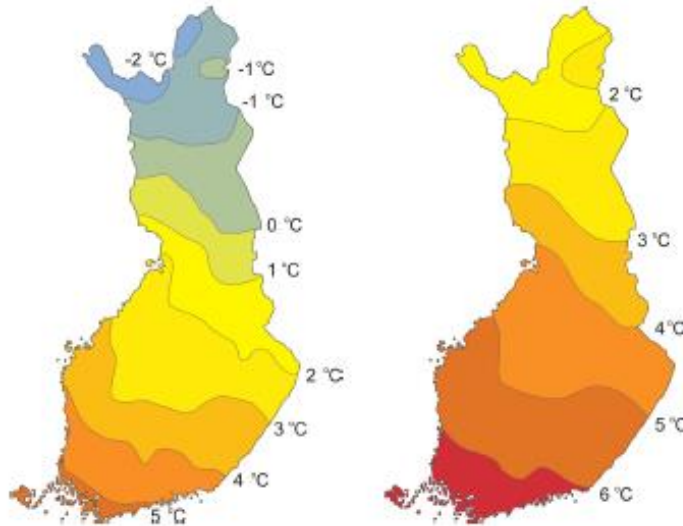
Maa- ja kallioperään on varastoitunut valtavasti lämpöenergiaa. Pintaosiin varastoitunut lämpöenergia on pääosin peräisin auringosta. Syvemmällä kallioperässä lämpöenergia on geotermistä energiaa, joka on enimmäkseen peräisin radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Geotermistä energiaa tulee myös syvältä Maan vaipasta ja ytimestä. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 7.)

Maanpinnan lämpötila vaihtelee vuorokauden- ja vuodenajan mukaan auringon säteilyn vaikutuksesta. Pinnan lämpötilamuutokset siirtyvät syvemmälle maa- ja kallioperään samalla vaimentuen. Mitä pidempijaksoisesta lämpötilanvaihtelusta on kyse, sitä syvemmälle sen vaikutukset yltävät. Päivittäinen pintalämpötilan vaihtelu ulottuu alle metrin syvyyteen. Noin 10-15 metrin syvyydessä myös vuositainen vaihtelu on suodattunut pois ja maan lämpötila on pintalämpötilan vaihtelun keskiarvo eli maanpinnan keskilämpötila. Syvemmällä maankamarassa lämpötila on maanpinnan keskilämpötilan ja geotermisen gradientin säätelemä. (Leppäharju 2008, 6–9.) Geotermisellä gradientilla tarkoitetaan kallioperän lämpötilan nousua syvemmälle mentäessä keskimäärin 0,5-1,5 °C/100m. Lämpötilan nousu aiheutuu geotermisestä energiasta. (Leppäharju 2008, 4; Juvonen & Lapinlampi 2013, 7.) Ilmiön seurauksena maan pohjoisosissa kallioperän lämpötila 200 metrin syvyydessä on noin 4-6 °C.

Ilman lämpötilan lisäksi maanpinnan lämpötilaan vaikuttavat muun muassa lumipeite, faasinmuutokset maaperän sulan ja jäätyneen olomuodon välillä, pinnan topografia ja kasvillisuus sekä veden liike maankamarassa. (Leppäharju 2008, 9.)

Suomessa maa- ja kallioperän pintaosien vuotuinen keskilämpötila on noin kaksi astetta ilman vuotuista keskilämpötilaa korkeampi (Kuvio 1), koska talvella maankamaran lämpötila on korkeampi kuin ilman lämpötila. Tämä johtuu faasinmuutoslämmöstä ja lumipeitteestä. Lämpiminä aikoina maanpinnan lämpötila noudattaa ilman lämpötilaa. Lämpötila vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan Poh-

jois-Lapin 1-2 °C:sta Etelä-Suomen 5-6 °C:seen. Geotermisen energian vaikutuksesta lämpötila vakiintuu Etelä-Suomessa noin 14-15 metrin syvyydessä 5-6 °C:seen. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 7; Leppäharju 2008, 10.)



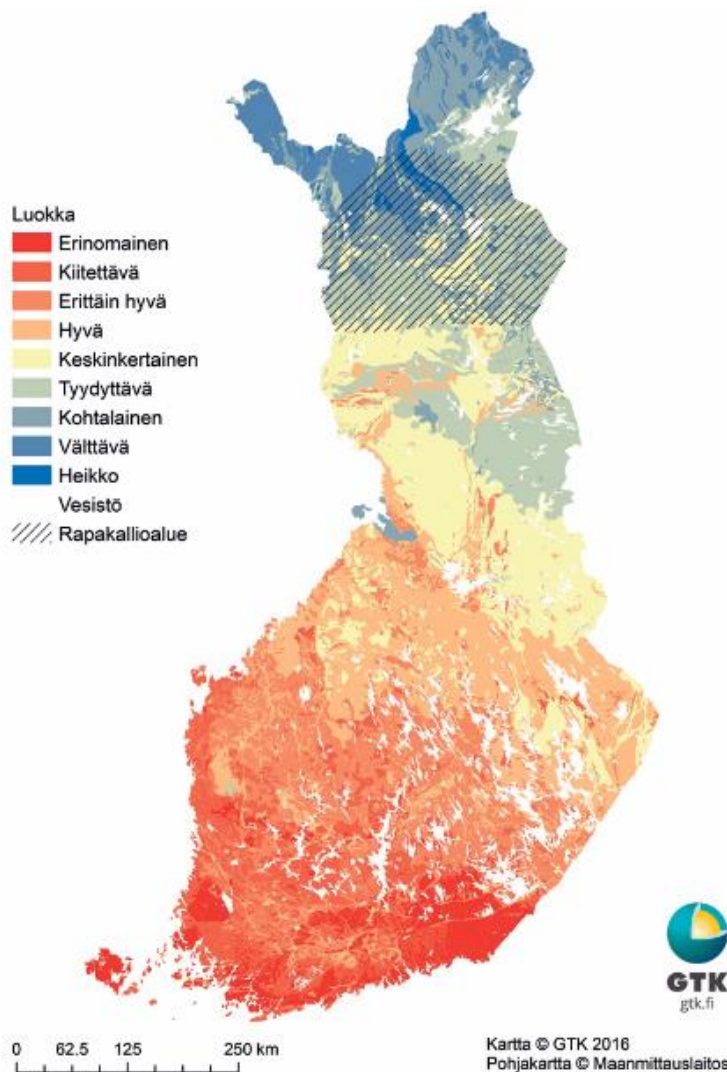
Kuvio 1. Vasemmalla ilman vuotuinen keskilämpötila vertailukaudelta 1971-2000 ja oikealla maanpinnan vuotuinen keskilämpötila (Leppäharju 2008, 11)

2.2 Maa- ja kallioperän lämpöominaisuuksia

Kallioperän koostumus, rikkonaisuus ja pohjaveden liikkeet vaikuttavat kallioperän lämpöominaisuuksiin. Lämpö siirtyy kallioperässä pääosin johtumalla, johon tuen aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Kivissä lämmönjohtavuus on verrattain huono, mutta eri kivi- ja maalajien lämmönjohtavuudessa on vaihtelua. Suomen kivilajeista paras lämmönjohtavuus on graniiteilla ja kvartsiiteilla. (Huusko 2016, 12–14; Juvonen & Lapinlampi 2013, 7.) Kallion lämmönjohtavuus on parempi kuin irtomaalajien ja kostea maa johtaa lämpöä paremmin kuin kuiva. Suomessa esiintyvien kivilajien lämmönjohtavuuden keskiarvo on noin 3,24 W/(mK), kun taas irtomaan lämmönjohtavuus on luokkaa 1W/(mK). (Leppäharju 2008, 4.)

Pohjavesi ja kallioperän rikkonaisuus parantavat lämmön siirtymistä maankamarassa. Kun pohjavesi liikkuu kallioperässä, lämpöä siirtyy johtumisen lisäksi myös konvektion avulla. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 7.)

Ominaislämpökapasiteetti kuvaa aineen kykyä varastoida lämpöä. Aine, jonka ominaislämpökapasiteetti on suuri, reagoi hitaasti ympäristön lämpötilan muutokseen. Kallion ja irtomaan ominaislämpökapasiteetit eivät juuri eroa toisistaan ($700\text{--}900\text{ J}/(\text{kg}\times\text{K})$), mutta huokoisuus ja huokosten täyte vaikuttavat irtomaassa merkittävästi. Huokostäytteenä oleva vesi parantaa maalajin ominaislämpökapasiteettia, koska veden ominaislämpökapasiteetti on noin viisinkertainen kallion tai irtomaan ominaislämpökapasiteettiin verrattuna ($4200\text{ J}/(\text{kg}\times\text{K})$). (Leppäharju 2008, 3–4.)



Kuvio 2. Maa- ja kallioperän maalämpöpotentiaali Suomessa (Huusko 2016, 13)

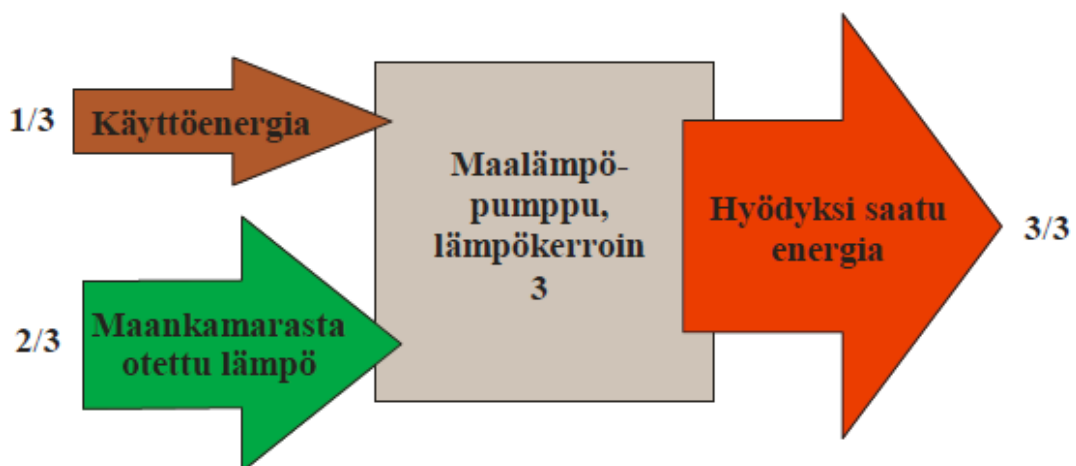
Maa- ja kallioperän maalämpöpotentiaali (Kuvio 2) on seurausta maa- ja kallioperän lämpötilasta ja lämpöominaisuuksista. Suurin vaikutus maalämpöpotentiaaliin on maanpinnan keskilämpötilalla (Kuvio 1), mutta kallioperän ominaisuudet ja pohjaveden liike aiheuttavat epäsäännöllisyyttä lämpötilavyöhykkeisiin.

3 MAALÄMPÖ

3.1 Maalämpöjärjestelmä yleisesti

Maa- ja kallioperään on varastoitunut runsaasti lämpöenergiaa, jota kutsutaan maalämmöksi. Lämpöpumpputekniikan avulla tätä lämpöenergiaa voidaan käyttää rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen. Lämpimänä aikana maalämpöjärjestelmää voidaan käyttää myös rakennusten jäähdyttämiseen. Maalämpöön investoiminen on sitä kannattavampaa, mitä suurempi rakennus ja energiankulutus on kyseessä. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 8, 12.)

Maalämpöjärjestelmä koostuu lämpöpumpusta, siirtoputkistosta ja keruupiiristä. Keruupiiri voidaan asentaa kallioon porattuun reikään, maaperään tai vesistöön. Tässä työssä käsitellään porareikään asennettua keruuputkistoa, jota kutsutaan energiakaivoksi. Keruuputkiston tehtävä on kerätä lämpöenergiaa. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 8.)



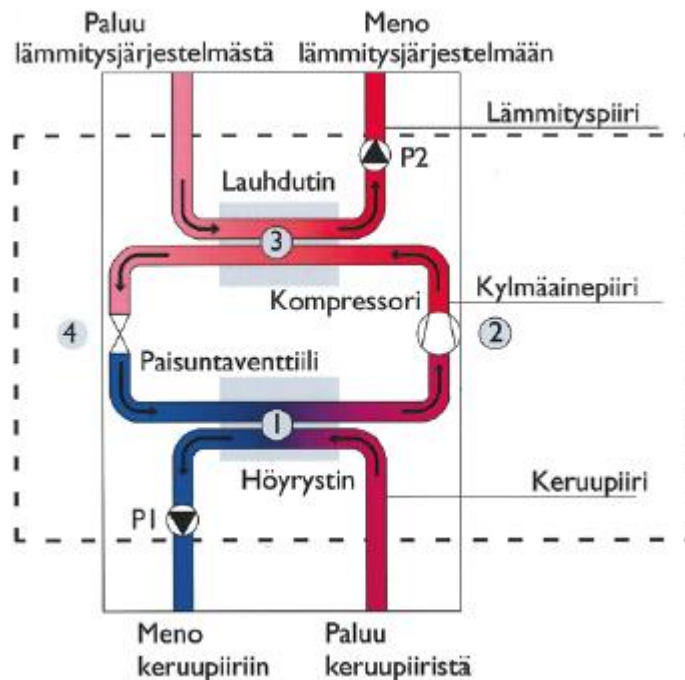
Kuvio 3. Esimerkki maalämpöpumpun energiavirroista. Kuvion järjestelmässä hyödyksi saatu lämpöenergia on kolminkertainen verrattuna lämpöpumpun käyttämään sähköenergiaan (Leppäharju 2008, 17)

Maalämpöpumpulla kallioperästä kerätty energia siirretään rakennusten käyttöön sähkön avulla. Hyödyksi saatava energiamäärä on moninkertainen verrattuna laitteen käyttämän energian määrään. Lämpökerroin kuvaa lämpöpumpun tehokkuutta. Se kertoo, kuinka paljon enemmän lämpöpumppu tuottaa lämpöenergiaa

kuin kuluttaa sähköenergiaa. Maalämpöpumpun lämpökerroin voi olla esimerkiksi 3 tai 5. Jos lämpökerroin on 3, hyödyksi saatavasta energiamäärästä $\frac{2}{3}$ on maankamarasta saatavaa ilmaisenergiaa ja $\frac{1}{3}$ kompressorin käyttöenergiaa (Kuvio 3). (Juvonen & Lapinlampi 2013, 8,10; Leppäharju 2008, 16–17.)

3.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Kuviossa 4 on esitetty maalämpöpumpun osat. Lämpöpumppu koostuu neljästä pääkomponentista ja kylmäainepiiristä. Pääkomponentteja ovat höyrystin, kompressori, lauhdutin ja paisuntaventtiili. Sähköä tarvitaan lähinnä kompressorin toimintaan. Kylmäainepiiri yhdistää komponentit. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 10.)



Kuvio 4. Maalämpöpumpun osat. Varsinainen lämpöpumppu rajattu katkoviivalla. P1 ja P2 ovat keruu- ja lämmityspiirin omat pumput (Juvonen & Lapinlampi 2013, 12)

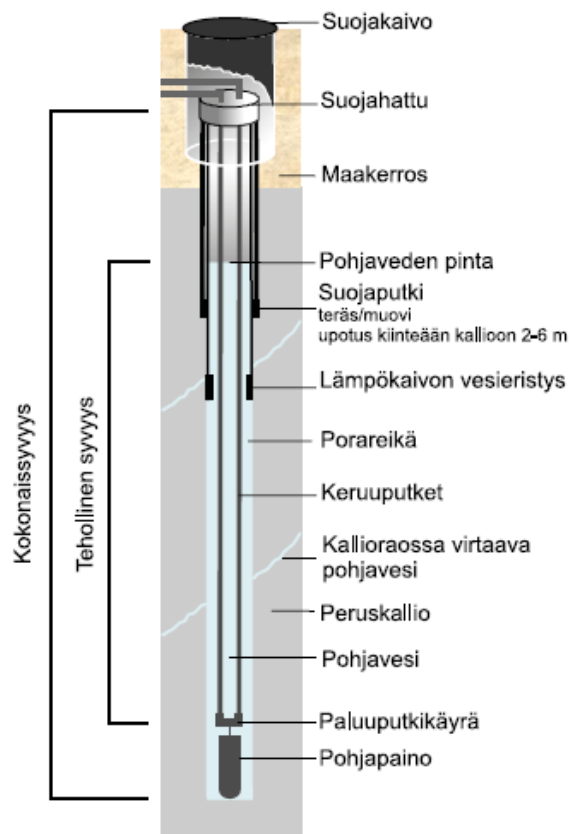
Kerueupiirissä lämmönkeruunesteeseen sitoutuu lämpöenergiaa, joka siirretään kerueupiirin pumpun avulla lämpöpumpun höyrystimeen. Höyrystimessä lämmönkeruuneste luovuttaa lämpöenergiaa lämpöpumpun kylmäainepiiriin ja kylmäaine muuttuu nesteestä kaasuksi. Seuraavaksi lämpöpumpun kompressori puristaa kylmäaineen korkeapaineiseksi kaasuksi, jolloin kaasun lämpötila nousee. Myös puristamiseen käytetty sähköenergia muuttuu lämmöksi ja kohottaa kylmäaineen

lämpötilaa. Kylmäaine kierrätetään kompressorin avulla lauhduttimelle. Lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa lämpöä lämmityspiiriin ja muuttuu takaisin nesteksi. Lauhduttimesta nestemäinen kylmäaine kulkeutuu paisuntaventtiilille, jossa kylmäaineen painetta alennetaan. Sen seurauksena myös kylmäaineen lämpötila laskee takaisin höyrystymislämpöön. Sitten kylmäaine virtaa takaisin höyrystimeen ja prosessi alkaa alusta. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 10,12.)

3.3 Energiakaivot

Energiakaivojen avulla energiaa kerätään syvältä kallioperästä tai ylimääräistä energiaa siirretään kiinteistöstä kallioperään. Energiakaivolla tarkoitetaan kalliioon porattua reikää, johon on asennettu lämmönkeruuputkisto (Kuvio 5). Keruuputkessa kiertää lämmönkeruuneste, joka siirtää keräämänsä energian käyttökohteelle. Energiakaivo on tyypiltään suljettu keruupiiri. Energiakaivojen porareikien syvyys ja lukumäärä riippuvat käyttökohteen energiantarpeesta. Tyypillisesti yksi energiakaivo on 120-300 metriä syvä. Jos yhdestä energiakaivosta saatava teho ei riitä, joudutaan poraamaan kaksi tai useampia energiakaivoja. Energiakaivojen etäisyyden toisistaan tulisi olla vähintään 15 metriä, jotta kaivot eivät käytä toistensa potentiaalia. Suomessa energiakaivojen porareikien halkaisijat vaihtelevat välillä 105-165mm. Energiakaivot ovat erittäin pitkäikäisiä. Oikein mitoitettun ja rakennetun kaivon käyttöikä on yli 50 vuotta. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 8–9, 11, 30, 33, 48; Leppäharju 2008, 69.)

Kaivon yläosaan asennetaan suojaputki, jonka tehtävä on estää maaperäkerroksen irtoaineksen pääsy porareikään ja sitä kautta pohjaveteen (Kuvio 5). Suoja-putkea upotetaan myös kiinteään kallioon. Upotussyvyys vaihtelee kahdesta kuu-teen metriin kallionpinnan rakenteen mukaan. Pohjavesialueella suoja-putkea upotetaan kiinteään kallioon aina vähintään 6 metriä. Suoja-putkena käytetään joko polyeteeni- tai teräsputkea. Suoja-putken lisäksi energiakaivo vesieristetään vähintään 6 metrin syvyyteen esimerkiksi muovisella eristysputkella tai betonoi-malla, jotta hulevedet eivät pääse porareikään. Lisäksi kaivo suojataan suojaha-tulla. Suoja-putkitettuun porareikään asennetaan U-lenkillä oleva lämmönkeru-putki, jonka päässä on pohjapaino. Painon tehtävä on helpottaa asennusta ja varmistaa, että putkiston paluuputkikäyrä pysyy porareiän pohjalla. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 33, 39; Leppäharju 2008, 24.)



Kuvio 5. Energiakaivon rakenne (Juvonen & Lapinlampi 2013, 35)

Suomessa energiakaivot porataan yleensä kallioon ja tavallisesti porareikä täyttyy itsestään vedellä. Ellei kaivo täyty itsestään, se joudutaan täyttämään. Jos porareikä yläosa jää kuivaksi, voidaan porareikä täyttää keruuputkien asennuksen jälkeen osittain esimerkiksi bentoniitilla. Näin parannetaan lämmön siirtymistä kallion ja keruuputkiston välillä. Energiakaivon tehollinen syvyys on osuus, jossa keruuputket ovat vedessä. Energiakaivosta saatavan energiamäärän arviona voidaan pitää 100 kWh/m. Maksimitehona pidetään yleensä noin 40-50 W/m. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 30, 33; Leppäharju 2008, 24.)

Lämpötila energiakaivoissa on kesällä alhaisempi kuin ilman lämpötila, joten maalämpöjärjestelmää voidaan tällöin käyttää rakennusten viilentämiseen. Viilennyksessä ei yleensä tarvita lämpöpumpun kompressoria. Energiakaivoista tulevaa viileää liuosta kierrätetään tuloilmavirran jäähdytyspatterin läpi, jolloin tuloilma jäähtyy ja liuos lämpenee. Lämmennyt liuos johdetaan takaisin energiakaivoon. Liuoksen lämpötila on korkeampi kuin ympäröivän kallion, joten lämpövirtaus tapahtuu liuoksesta kallioon. (Leppäharju 2008, 28.)

3.4 Lämmönkeruunesteet

Keruuputkistossa käytettävän lämmönkeruunesteen tehtävä on sitoa lämpöenergiaa kallioperästä ja kuljettaa se höyrystimelle. Käytössä olevien lämmönkeruunesteiden ominaisuudet eroavat jonkin verran toisistaan ja ne riippuvat liuoksen lämpötilasta ja pitoisuuksista. Lämmönkeruunesteen pitää kestää pakkasta jäätymättä, joten se on tavallisesti alkoholin ja veden seos. Hyvän lämmönkeruunesteen muita tärkeitä ominaisuuksia ovat alhainen viskositeetti, hyvä lämmönjohtavuus sekä korkea ominaislämpökapasiteetti. Lisäksi hyvän lämmönkeruunesteen tulisi olla pitkäikäinen, myrkytön, biologisesti hajoava ja yhteensopiva useiden materiaalien kanssa. Joitakin lämmönkeruunesteiden ominaisuuksia voidaan parantaa lisäaineiden avulla, mutta lisäaineet saattavat hidastaa lämmönkeruunesteiden hajoamista. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 46–47, 51.)

Tällä hetkellä Suomessa käytetään lämmönkeruunesteenä yleisimmin etanolia, jonka ominaislämpökapasiteetti on suhteellisen korkea. Keruuputkistoissa käytettävä laimennettu etanoliliuos on tavallisesti vahvuudeltaan 28% ja sen jäätymispiste on -17 °C. Etanolia ei luokitella ihmiselle tai ympäristölle haitalliseksi, mutta se on helposti syttyvää. Etanolipitoiset lämmönkeruunesteet sisältävät pienen määrän denaturointiaineita, joiden tarkoitus on tehdä liuksesta nautittavaksi kelpaamatonta. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 18, 46–47.)

Keruuputkistoissa voidaan joskus käyttää myös kaliumformiaattiliuosta tai betaiinipohjaista liuosta. Kaliumformiaatin käyttö on yleisempää jäähdytysjärjestelmissä kuin maalämpöjärjestelmissä. Kaliumformiaatti ja betaiini eivät ole palavia eivätkä ihmiselle tai ympäristölle haitallisia. Kaliumformiaatti on muita lämmönkeruunesteitä korroosiivisempi, sillä on korkea lämmönjohtavuus ja alhainen viskositeetti. Betaiini hajoaa anaerobisissa olosuhteissa ja voi aiheuttaa pohjaveteen epämiellyttävää hajua. Vanhemmissa maalämpöjärjestelmissä on käytetty myös muita lämmönkeruunesteitä, mutta niiden käytöstä on luovuttu terveys- ja ympäristövaikutusten tai muiden huonojen ominaisuuksien takia. Keruupiiri on suljettu, joten normaalisti toimiessaan se ei aiheuta päästöjä ympäristöön. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 46–47.)

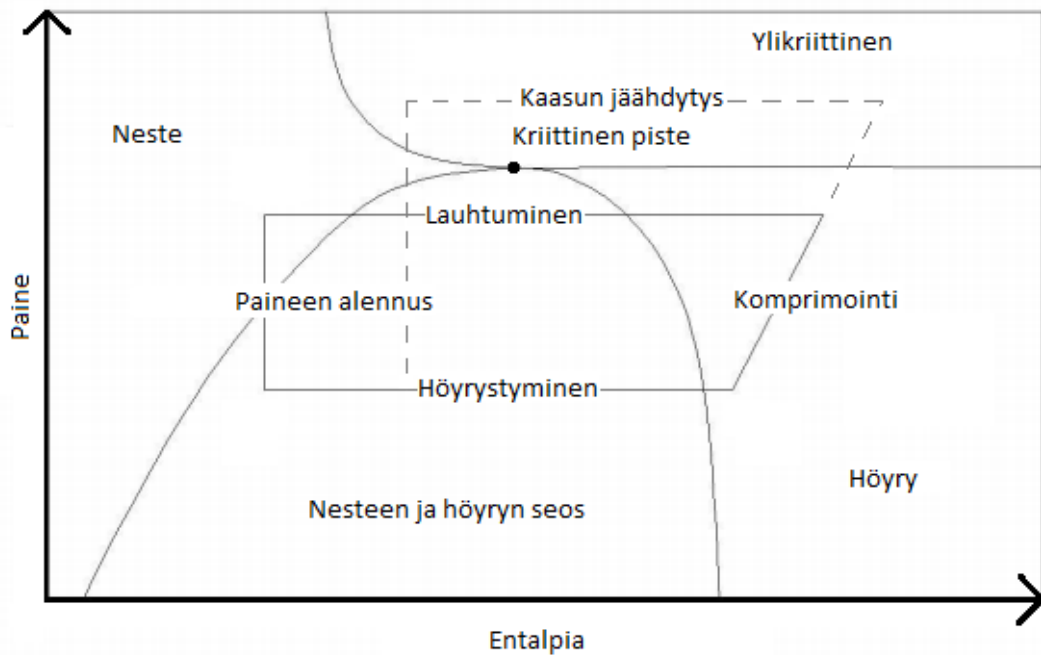
4 KYLMÄNTUOTANTO

4.1 Kylmäprosessi

Kylmää tuotetaan kylmäprosessin avulla. Siinä lämpöenergiaa siirretään matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Tällaista siirtymistä ei tapahdu luonnollisesti, mutta kylmäaineen avulla se voidaan toteuttaa keinotekoisesti. Kylmäprosessi perustuu työaineena käytettävään kylmäaineeseen ja sen olomuodonmuutoksiin. Kylmäprosessin toimintaperiaate ja komponentit ovat samat kuin lämpöpumpussa. Kylmäntuotannossa ei kuitenkaan ole keruupiiriä, vaan kylmäaine sitoo höyrystimessä lämpöä suoraan ympäristöstään. Joissain tapauksissa käytetään myös välillistä höyrystystä. (Mäkitalo 2015, 11, 24.)

Kylmäprosessi voidaan esittää log p, h -tilapiirroksessa (Kuvio 6). Piirroksessa pystyakselilla on logaritminen paineen arvoasteikko ja vaaka-akselilla entalpian eli lämpösisällön arvot. Rajakäyrä erottaa aineen eri olomuodot. Kriittinen piste on rajakäyrän huippukohdassa. Käyrän vasemmalla puolella kylmäaine on nestettä ja oikealla puolella kylmäaine on höyryä. Tasapainokäyrän sisäpuolella kylmäaine on nesteen ja höyryn seos. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 19.) Seoksen alueella lämpötilakäyrät kulkevat vaakatasossa, nesteen alueella lämpötilakäyrät nousevat ylöspäin ja höyryn alueella ne kaartuvat alaspäin (Mäkitalo 2015, 12).

Kuvion 6 keskellä oleva puolisuunnikas kuvaa kylmäaineen termodynaamisia ominaisuuksia kylmäprosessin eri vaiheissa. Puolisuunnikkaan alareuna kuvaa kylmäaineen höyrystymistä höyrystimessä. Höyrystimen jälkeen kylmäaine johdetaan kompressorille. Puolisuunnikkaan oikea reuna kuvaa kompressorin tekemää työtä, jolloin kylmäaineen lämpötila ja paine nousevat halutulle tasolle. Puolisuunnikkaan yläreuna kuvaa kylmäaineen lauhtumista takaisin nesteeksi. Samalla kylmäaine luovuttaa lämpöenergiaa. Vasemman reunan pystyviiva kuvaa paineen alennusta paineenalennusventtiilissä, jonka jälkeen kierto alkaa alusta. Piirroksen avulla voidaan lisäksi arvioida muun muassa höyrystimen ja lauhtuttimen tehoja sekä komprimoinnin vaatimaa tehoa. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2011, 19; Mäkitalo 2015, 12–13.)



Kuvio 6. Kylmäprosessi log p, h -piirroksessa. Alikriittinen prosessi kuvattu yhte-näisellä viivalla ja ylikriittinen prosessi katkoviivalla

Kylmäprosessi voi olla joko alikriittinen tai ylikriittinen (Kuvio 6). Alikriittisessä kylmäprosessissa kylmäaineen lämpötila ja paine eivät nouse missään vaiheessa kiertoa kriittisen pisteen yläpuolelle. Suurin osa lauhtumisesta tapahtuu vakiopaineessa ja lämpötilassa. Kun kylmäaineen paine ja lämpötila nousevat kriittisen pisteen yläpuolelle, sanotaan kylmäprosessin olevan ylikriittinen. Ylikriittisessä prosessissa kylmäaine on kaasua ja lämmönluovutus tapahtuu täysin kaasun jäähtyessä. Tällöin paine pysyy vakiona, mutta lämpötila muuttuu sen mukaan, kuinka paljon lämpöä luovutetaan kaasunjäähtymisessä. Kaasu muuttuu nesteen ja höyryn seokseksi paisuntaventtiilissä, kun paine lasketaan kriittisen pisteen alapuolelle. Ylikriittisessä prosessissa puhutaan lauhtumisen sijaan kaasunjäähtymisestä ja tapahtumaa kutsutaan lauhtumisen sijaan kaasun jäähtymiseksi. Lauhdutusenergian tarve on ylikriittisessä kylmäprosessissa huomattavan suuri, joten ylikriittinen prosessi soveltuu hyvin kohteisiin, joissa tarvitaan sekä kylmää että lämmitystä. (Aittomäki 2012, 71; Manner 2013, 12–13; Mäkitalo 2015, 13–15; Sarkar 2010, 23.)

4.2 Kylmäaineet

Lämpöpumpun kylmäainepiirissä kiertää kylmäaine ja sen tehtävä on toimia välittäjäaineena. Kylmäaineet ovat nesteytettyjä kaasuja. Kylmäaineiden toiminta perustuu niiden ominaisuuksiin vastaanottaa lämpöenergiaa höyrystyessään ja vastaavasti luovuttaa lämpöenergiaa lauhtuessaan takaisin nesteeksi. (Mäkitalo 2015, 15.)

1900-luvun alussa kylmälaitteissa alettiin käyttää CFC-yhdisteitä. Myöhemmin huomattiin, että ne tuhoavat otsonikerrosta ja siirryttiin otsonikerroksen kannalta vähemmän haitallisiin HCFC- ja HFC-yhdisteisiin. Molemmat yhdisteet ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja, mutta HFC-aineet eivät tuhoa otsonikerrosta. CFC-yhdisteiden käytöstä luovuttiin vaiheittain 1990-luvun aikana. HCFC-yhdisteiden käytön vaiheittainen lopettaminen tapahtuu vuosien 1996-2030 aikana. Vuoden 2014 lopun jälkeen näitä aineita ei ole saanut enää käyttää kylmälaitteiden huollossa. Vuoden 2015 alussa tuli voimaan uusi F-kaasuasetus, jonka tarkoituksena on rajoittaa kasvihuoneilmiötä edistävien HFC-yhdisteiden käyttöä. Pyrkimys siirtyä kasvihuoneilmiön ja otsonikerroksen kannalta vähemmän haitallisiin kylmäaineisiin on lisännyt kiinnostusta luonnollisia kylmäaineita, kuten ammoniakkaa ja hiilidioksidia, kohtaan. Esimerkiksi hiilidioksidin ilmastovaikutukset ovat yli tuhat kertaa pienemmät kuin vanhoilla kylmäaineilla. (Aalto 2008, 1–3; Karppinen 2016, 3–5; Manner 2013, 9.)

Hiilidioksidi on epäorgaaninen kylmäaine, jonka termodynaamiset ominaisuudet poikkeavat huomattavasti perinteisistä epäorgaanisista kylmäaineista. Hiilidioksidin aineominaisuudet poikkeavat voimakkaimmin muista käytössä olevista kylmäaineista korkean kriittisen paineen ja matalan kriittisen lämpötilan osalta. Hiilidioksidin käytön etu kylmälaitteissa on sen hyvä lämmöntalteenottopotentiaali. Korkea käyttöpaine tuo haasteita komponenttien kestävyydelle, mutta se tarkoittaa myös sitä, että hiilidioksidin tiheys on muihin kylmäaineisiin verrattuna moninkertainen. Tämä mahdollistaa pienten komponenttien käytön laitteistoissa ja koska komponentit ovat pieniä, järjestelmän lämpösäteilyhäviöt ovat pieniä. Lisäksi hiilidioksidi on turvallinen ja palamaton kylmäaine. (Manner 2013, 1, 9, 11, 14–15.)

Lämpöpumpuissa käytetään nykyään ainoastaan ympäristöystävällisiä kylmäaineita, jotka eivät vahingoita ilmakehän otsonikerrosta. Kasvihuonevaikutuksen takia on huolehdittava, että kylmäaineita ei pääse ilmakehään. Siksi lämpöpumpukoneisto on ilmatiiviisti suljettu. (Leppäharju 2008, 15.)

4.3 Lauhdelämpö ja lämmöntalteenotto

Kylmäprosessissa syntyy lauhdelämpöä, kun höyrystimessä ja kompressorissa sidottu lämpöenergia luovutetaan pois kylmäainepiiristä. Kylmälaitoksen lauhdelämpö muodostuu tulistuslämmöstä, varsinaisesta lauhdelämmöstä ja alijäähdytyksestä. Varsinaisen lauhdelämmön osuus on selvästi suurin, noin 80-90%. Lauhtumisesta saatava energiamäärä on huomattavan suuri, joten sen hyödyntäminen on kokonaisenergiataloutta ajatellen merkittävää. Syntyvän lauhdelämmön määrään vaikuttaa hyvin paljon käytettävä kylmäaine ja sen termodynaamiset ominaisuudet. Varsinkin hiilidioksidia käytettäessä lauhdelämpöä syntyy runsaasti. (Kortesoja 2015, 4; Mäkitalo 2015, 20, 30–31; Peltola 2013, 11.)

Kylmälaitoksen lauhdelämpö voidaan poistaa kokonaan ulkoilmaan, mutta laitoksen kokonaishyötysuhdetta voidaan parantaa lämmöntalteenotolla. Lauhdelämmön hyödyntämiseksi on kehitelty erilaisia lämmöntalteenottojärjestelmiä. Lauhdelämpöä käytetään esimerkiksi rakennusten ja käyttöveden lämmitykseen, ilmastoinnin tuloilman lämmitykseen, sulanapitoon sekä tuotantoprosessien lämmitykseen. Lisäksi hukkalämpöä pyritään lataamaan porakaivojen kautta kallio-perään hyödynnettäväksi myöhemmin. (Espo 2014, 19; Kortesoja 2015, 6; Manner 2013, 15; Mäkitalo 2015, 20–21.)

Lauhduttimen tai kaasunjäähdyttimen lämpö voidaan hyödyntää suoraan tai välillisesti rakennuksen lämmitysjärjestelmissä (Manner 2013, 16, 26–27). Jos lauhdelämpö lauhdutetaan suoraan kylmäkoneen lauhduttimesta rakennuksen huoneilmaan, puhutaan suorasta lauhdutuksesta. Välillisessä lauhdutuksessa lämpö lauhdutetaan lämmönsiirtimen kautta nestepiiriin, josta lämpöä voidaan esimerkiksi jakaa lattialämmitykseen tai varastoida kallio-perään. (Peltola 2013, 12.)

Kun kylmäaineena käytetään hiilidioksidia, kylmäprosessi voi olla alikriittinen tai ylikriittinen. Lämmöntalteenottoa suunniteltaessa on otettava huomioon, että kriit-

tisen pisteen eri puolilla lämmönluovutus tapahtuu eri tavoilla. Alikriittisessä laitoksessa lämmönluovutus tapahtuu pääasiassa aineen lauhtuessa takaisin nesteksi, kun taas ylikriittisessä laitoksessa lämmönluovutus toteutuu lähinnä kylmäaineen jäähtyessä. Ylikriittisessä prosessissa lauhdelämpöä vapautuu alikriittistä prosessia enemmän. Lämmöntalteenottoa käytettäessä on kuitenkin varmistettava, ettei kylmälaitoksen toimivuus vaarannu. (Kortesoja 2015, 6; Manner 2013, 15–16.)

Yksi lauhdutuslämmön hyödyntämisen ongelmista on sen matala lämpötilataso. Siitä huolimatta energiavirta voi olla hyvinkin suuri. Silloin lämpötilaa voidaan nostaa lämpöpumppujen avulla paremmin hyödynnettävään tasoon. (Kortesoja 2015, 4, 6.)

Parhaiten lauhdelämpöä on hyödynnetty myymäläkohteissa, koska niissä on suuri jäähdytysteho ja samanaikainen tarve lämmitysenergialle (Peltola 2013, 12). Monissa eri esimerkeissä myymäläkiinteistön hiilidioksidikylmälaitoksen alikriittisessä prosessissa vapautuva lauhdelämpö riittää koko myymäläkiinteistön käyttöveden lämmittämiseen (Aittomäki 2012, 212).

4.4 Lauhde-energian lataaminen maahan

Maalämpöpumpun avulla lauhteen sisältämä energia voidaan siirtää energiakaivojen kautta maahan, kun lämpöä ei tarvita muualla. Lämmönlatauksen ansiosta maan lämpötila nousee. Tämän seurauksena maan maalämpöpotentiaali kasvaa ja maalämpöpumpun hyötysuhde paranee. Lauhteen lataamisella maahan on positiivinen vaikutus myös kylmälaitoksen taloudellisuuteen, kun lauhdutuslämpötila saadaan pidettyä alhaisena ympäri vuoden. (Espo 2014, 20; Motiva 2012, 10.)

Lauhde-energian lataamisella maahan on ollut kokemusten perusteella positiivisia vaikutuksia kokonaisenergiatalouteen, mutta siitä ei ole Suomessa vielä kovinkaan paljoa tutkimusmateriaalia. Peltolan (2011) tutkimuksessa tutkittiin maahan ladattavan lauhdelämmön määrää suhteessa maasta otettavaan energiaan, mutta ei esimerkiksi selvitetty, miten maahan ladattu energia vaikutti maan lämpötilaan. Lauhde-energian latauksen vaikutuksia maaperän lämpötilaan ei ole Suomessa tutkittu muutenkaan. Ruotsissa lauhdelämmön lataamista maahan on

tutkittu jo enemmän ja tulokset vaikuttavat lupaavilta. (Espo 2014, 20; Motiva 2012, 10; Mäkitalo 2015, 35.)

Kallioperän kivilajit ja rakenne sekä pohjaveden liikkeet vaikuttavat lämpöenergian säilymiseen kallioperässä. Jos kallioperän ominaisuudet ovat sopivia ja pohjaveden liike on vähäistä, voi lämpöenergiaa varastoida kallioperään kohtuullisen pitkäksi ajaksi. Pohjaveden virtaukset voivat sulkea pois mahdollisuuden varastoida lämpöä kallioperään. (Manner 2013, 38; Mäkitalo 2015, 35.)

5 TUTKITTAVAN ENERGIAKAIVOJÄRJESTELMÄN ESITTELY

5.1 Järjestelmän perustiedot

Tutkimuskohteena ovat rovaniemeläisen, vuonna 2013 valmistuneen Rantaviti-kan Salen myymäläkiinteistön kylmälaitokseen liitetyt energiakaivot. Laitos on toteutettu niin, että energiakaivojen ja suoran lämmöntalteenoton avulla kaupan kylmälaitteista tuleva lauhde-energia pyritään hyödyntämään mahdollisimman hyvin. Myymälän kylmälaitos käyttää kylmäaineena hiilidioksidia, ja tuottaa näin runsaasti lauhdelämpöä.

Energiakaivoja on yhteensä neljä ja ne ovat kaupan seinustalla rivissä noin kymmenen metrin päässä toisistaan. Kaivot on porattu kohtisuoraan alaspäin ja porareian putkikoko on 115 mm. Kunkin kaivon tehollinen syvyys on 200 metriä. Lämmönkeruuputkisto on kaivoissa U-lenkillä ja putken halkaisija on 40 mm. Keruuputkistossa kiertää 27 til- % etanoliliuos. Energiakaivoja varten ei ole tehty maaperätutkimusta, eikä pohjaveden virtauksista ole tietoa.

Energiakaivoja käytetään kylmäaineen jäähdyttämiseen ja samalla lauhdelämpöä ladataan maahan. Lisäksi niitä käytetään lisälämmöntuotantoon sekä kylmälaitoksen kaasunjäähdyttimenä. Kaivoissa kiertävällä maaliuoksella pystytään kesällä viilentämään ja syksyllä kuivattamaan tuloilmaa ilmanvaihtokoneella.

Koko myymäläkiinteistön lämmitystarve on pystytty kattamaan kylmäkoneikon lauhde-energialla ja energiakaivoista otetulla lämpöenergialla. Kylmäkoneikon kylmäteho on 40 kW ja pakkasteho 15 kW. Kaupan lämmitettävä ala on 520 m² ja myymälän ala on 391 m².

5.2 Kylmäkoneen lauhdutus ja lauhde-energian lataaminen maahan

Tutkittavassa laitoksessa osa kylmätuotannossa muodostuvasta lämpöenergiasta johdetaan lämmönvaihtimien kautta energiakaivoihin. Energiakaivojen osuus lauhdutuksessa on suuri varsinkin lämpiminä vuodenaikoina, kun lauhdustehontarve on suuri ja lämmitystarve pieni. Yksi energiakaivojen tehtävistä on siis ladata lauhde-energiaa maahan. Kun lauhde-energiaa ladataan maahan, maapiirin ja kallioperän lämpötila nousee.

Tässä järjestelmässä lämmönvaihtimet, joiden kautta lauhdelämpöä siirretään energiakaivoihin, ovat vaihtimet HE40 ja HE50. Samalla HE40-lämmönvaihdin toimii myös kaasunjäähdyttimenä. HE50-vaihtimen toinen tehtävä on toimia energiakaivojen avulla kylmälaitteiston alijäähdytysvaihtimena. Nämä lämmönvaihtimet ovat levylämmönvaihtimia, joissa toisella puolella virtaa kylmäaine, hiilidioksidi, ja toisella puolella välittäjäaineena on energiakaivojen vesi-etanoli-seos. Lämmönvaihtimia ohjataan venttiilien ja automatiikan avulla.

Energiakaivojen ansiosta kylmäkoneen lauhdutusteho pysyy lähes samana ympäri vuoden. Siksi niiden käyttö kylmäkoneen lauhdutukseen on tehokasta. Energiakaivojen suuren lauhdutustehon ansiosta kylmäaineen lämpötila saadaan lauhdutettua alhaiseksi myös lämpiminä aikoina.

5.3 Lisälämmöntuotanto

Energiakaivoja käytetään lisälämmöntuotantoon vain silloin, kun kaupan kylmäjärjestelmästä saatava lauhde-energia ei riitä kiinteistön lämmitykseen. Silloin kylmäkoneikko alkaa jäähdyttää keruupiirin liuosta lämmönvaihtimen kautta. Erilistä maalämpöjärjestelmää ei tarvita, koska kylmäkoneikko toimii maalämpöpumppuna. Toimintaperiaate on sama kuin tavallisessa maalämpöjärjestelmässä.

Kylmäkoneikon järjestelmässä on yksi lämmönvaihdin (HE60), jolla tuotetaan lisälämpöä. Se höyrystää kylmäainetta ja näin lisää kuormaa kompressoreille. Energiakaivot toimivat kylmäkuormana osalle kylmäkoneikon kompressoreista. Kuorman lisääntyessä myös lauhdepuolen energia lisääntyy ja saadaan tuotettua lisää lämpöä. Lämmönvaihtimen toisella puolella virtaa kylmäaine, hiilidioksidi, ja toisella puolella välittäjäaineena on energiakaivojen vesi-etanoli-seos.

Kun kylmäainetta höyrystetään keruupiirin etanoliliuoksen avulla, kylmäaineen massavirta kylmäainekierrossa kasvaa ja keruupiirissä kiertävä etanoliliuos jäähtyy. Jäähtynyt etanoliliuos kerää kallioperästä lämpöenergiaa ja palaa luovuttamaan kerätyn energian lämmönvaihtimen kautta kylmäaineelle. Kasvava kylmäaineen massavirta tarkoittaa, että lauhdutusteho kasvaa ja näin saadaan lisää lämpöenergiaa kiinteistön lämmitykseen.

6 MITTAUKSET

6.1 Mittausten tavoite

Mittausten tavoitteena oli tutkia, miten kylmälaitokseen liitettyjen energiakaivojen lukumäärä vaikuttaa kaivojen lämpötilatasoihin ja toimintaan. Mittausten avulla selvitettiin, kuinka hyvin energiakaivojen mitoitusarvo pitää paikkansa. Kevään mittausjaksolla kokeiltiin myös HE40-lämmönvaihtimen ohituksen vaikutusta kaivoihin. Lisäksi tarkoituksena oli tutkia lauhde-energian lataamista maahan eli selvittää, kuinka kauan ladattu lauhdelämpö säilyy kallioperässä. Mittauksia tehtiin talvella, keväällä ja kesällä, joten dataa saatiin erilaisista sääolosuhteista.

Tutkimuskohteena olevassa laitoksessa on tehty mittauksia ja tutkimuksia aiemminkin. Mittausten avulla nykyisten ja tulevien laitosten toimintaa pyritään kehittämään ja optimoimaan. Mittausten avulla voidaan arvioida ja suunnitella esimerkiksi energiakaivojen kannattavuutta taloudellisesti sekä energiateknisesti. Energiakaivojen mitoituksessa käytettävää varmuuskerrointa voidaan mahdollisesti pienentää, kun saadaan varmempaa tietoa kaivojärjestelmän toiminnasta.

Olettamuksena on, että kaivojen lämpötilatasot ja toiminta ovat sitä vakaampia mitä enemmän kaivoja on käytössä. Kolmella kaivolla järjestelmä toimisi vielä lähes yhtä hyvin kuin neljällä kaivolla. Laitos toimisi mahdollisesti vielä kahdellakin kaivolla, mutta yksi kaivo ei riittäisi. HE40-lämmönvaihtimen ohituksen oletetaan vaikuttavan kaivojen lämpötilaan niin, että lämpötila laskee tietylle tasolle ja jää siihen. Lauhde-energian uskotaan säilyvän kallioperässä muutaman viikon ajan.

6.2 Mittauskohdat

Energiakaivoihin on asennettu lämpötila-anturit sekä kaivoihin menevälle että kaivoista tulevalle liuokselle. Kaikkien neljän kaivon liuos kulkee samojen mittareiden kautta. Näiden mittarien avulla pystytään seuraamaan energiakaivojen toimintaa. Lisäksi ulkolämpötilalle ja myymälän sisälämpötilalle on omat lämpötila-anturit. Ulkolämpötilaa mittaamalla pystytään seuraamaan sen vaikutusta järjestelmään ja tutkimuksiin. Mittarit keräävät dataa jatkuvasti ja rekisteröivät sen tie-

tojärjestelmään. Talvella ja keväällä mittausväliksi valittiin yksi minuutti, joten jokaiselta anturilta tuli 1440 mittausarvoa vuorokaudessa. Kesän mittausjaksolla mittausväli oli viisi minuuttia, joten arvoja tuli 288 vuorokaudessa.

Kylmälaitoksen toiminnan seuraamisen ja kehittämisen takia laitokseen on asennettu lukuisia muitakin mittausantureita, mutta tässä työssä niitä ei hyödynnetty, koska tarkoituksena oli perehtyä vain energiakaivojen toimintaan. Kylmäjärjestelmän energiaseuranta ja toimintaa on tarkasteltu tarkemmin Miikka Mäkitalon opinnäytetyössä ”Hiilidioksidikylmäjärjestelmän energiaseuranta ja toiminnan kehittäminen lähikaupassa” (2015).

6.3 Mittausjaksot

Mittauksia tehtiin kolmessa jaksossa. Koska talven, kevään ja kesän mittausjaksot poikkeavat toisistaan, tarkastellaan niitä omina kokonaisuuksinaan. Ensimmäiset mittaukset tehtiin tammikuun 2016 aikana. Dataa kerättiin neljää, kolmea ja kahta kaivoa käyttäen. Ensin kaivoista suljettiin yksi ja kolmella kaivolla ajettiin seitsemän päivää. Tämän jälkeen suljettiin toinenkin kaivo ja mittauksia jatkettiin kymmenen päivää kahdella kaivolla. Lisäksi normaalista neljän kaivon käytöstä on dataa neljältä päivältä tammikuun alusta ja yhdeksältä päivältä kuun lopusta (Taulukko 1). Talven mittauksissa kerättiin tietoa kaivoihin menevän ja kaivoista tulevan liuoksen lämpötilasta, ulkolämpötilasta sekä myymälän sisälämpötilasta.

Kevään mittauksia tehtiin maaliskuun puolesta välistä toukokuun ensimmäiselle viikolle asti. Myös keväällä dataa kerättiin neljää, kolmea ja kahta kaivoa käyttäen, mutta lisäksi kokeiltiin käyttää kahta kaivoa ja HE40-lämmönvaihtimen ohitusta. HE40-lämmönvaihtimen kautta ylimääräistä lauhdelämpöä ladataan maahan, joten sen kytkeminen pois käytöstä tarkoittaa sitä, että kaivot eivät käytännössä ole ollenkaan käytössä. Mittausjakson alusta on dataa viideltä päivältä neljällä kaivolla. Seuraavaksi käytettiin kolmea kaivoa ja dataa kerättiin kymmenen päivän ajan. Sitten suljettiin toinenkin kaivo ja datan keräämistä jatkettiin kahta kaivoa käyttäen. Tässä mittausvaiheessa datan keräyksessä ilmeni häiriötä, joten datassa on kaksi kertaa lähes kolmen vuorokauden mittainen aukko. Lisäksi tässä vaiheessa testattiin yhdeksän päivän ajan HE40-lämmönvaihtimen ohituk-

sen vaikutusta, minkä jälkeen mittauksia jatkettiin vielä vuorokauden ajan kahdella kaivolla ilman ohitusta. Kahdella kaivolla mittausdataa kertyi yhteensä kolmentoista vuorokauden ajalta. Mittausjakson lopusta on dataa vielä kahdeksalta päivältä neljällä kaivolla (Taulukko 1). Kevään mittauksissa kerättiin samoja tietoja kuin talvella.

Taulukko 1. Eri mittausjaksojen pituudet vuorokausina

	Neljä kaivoa	Kolme kaivoa	Kaksi kaivoa	Kaksi kaivoa ja HE40 ohitus
Talvi	4 + 9	7	10	-
Kevät	5 + 8	10	12 + 1	9

Kesän mittauksen tarkoituksena oli tutkia lauhde-energian lataamista maahan. Mittaukset toteutettiin heinä-elokuun vaihteessa, kun ulkolämpötila ja samalla myös kaivojen lämpötila oli mahdollisimman korkea. Mittausjaksolla kaikki kaivot laitettiin pois käytöstä ja laitosta ajettiin pelkällä kaasunjäähdyttimellä. Tarkoituksena oli seurata, kuinka kauan kaivojen jäähtyminen takaisin normaaliin kalliope-
rän lämpötilaan (4-5°C) kestää. Kaivot olivat pois käytöstä hieman yli kahdeksan vuorokautta. Mittaus jouduttiin keskeyttämään suunniteltua aikaisemmin, koska ilmakeuhuus kaupassa nousi liian korkealle. Kesän mittausjaksolla seurattiin pelkästään kaivoihin menevän ja kaivoista tulevan liuoksen lämpötiloja sekä ulko-
lämpötilaa.

6.4 Mittauksen analysointi

Antureilta saatava data on Excel-tilukkomuodossa ja aineiston analysointi tehtiin Excel-ohjelmalla. Aineistoa analysoitiin laskemalla datasta keskiarvoja, minimi- ja maksimiarvoja, lämpötilan muutoksia, piirtämällä viivakaavioita sekä mallintamalla.

Mallintamista hyödynnettiin, kun reilun kahdeksan vuorokauden datan perusteella haluttiin selvittää, kuinka kauan olisi mennyt, että keruuliuksen lämpötila olisi laskenut kalliope-
rän normaalille lämpötilatasolle (4-5°C). Tämä tehtiin mallintamalla mittauksista saadun kuvaajan perusteella liuoksen jäähtyminen, jos kaivoja ei olisi otettu käyttöön.

Mallintaminen aloitettiin tekemällä kaivoista tulevan lämpötilan kuvaaja ajan suhteen jaksolta, jolloin kaivot olivat pois käytöstä. Kuvaajaa tarkastelemalla huomattiin, että mitatut pisteet toteuttavat potenssifunktion kaavaa:

$$y = ax^n \quad (1)$$

missä

y	on	Kaivoista tulevan liuoksen lämpötila (°C)
x	on	Aika
a	on	Vakio
n	on	EkspONENTTI

Tämän jälkeen mitattuihin pisteisiin sovitettiin Excelin automaattisella trendiviiva-työkalulla pisteisiin parhaalla mahdollisella tavalla sopiva potenssifunktio. Työkalu laskee automaattisesti potenssifunktion kaavan vakion ja eksponentin arvon sekä antaa korrelaatiokertoimen, joka kertoo, kuinka yhteneväisiä mitatut pisteet ovat mallinnetun potenssifunktion kanssa eli prosentuaalisesti kuinka suuri osa mitattujen pisteiden arvoista on samoja kuin mallinnetun potenssifunktion antamat arvot. Saadulla funktiolla voidaan laskea sekä lämpötilan että ajan arvoja myös mittausjakson ulkopuolelta eli näin ennustaa lämpötilan kehittymistä kalli-ossa.

7 MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

7.1 Talven mittaukset

7.1.1 Ulkolämpötila talven mittausjaksolla

Ulkolämpötila ei suoraan vaikuta kallion lämpötilaan energiakaivojen ympärillä, mutta se vaikuttaa myymälästä tulevan lauhdelämmön määrään ja myymälän tarvitseman lisälämmön määrään. Kylmällä säällä myymälä tarvitsee enemmän lämpöä kuin lämpimällä säällä. Kun lauhdelämpö ei riitä rakennuksen lämmittämiseen, lisälämpöä otetaan kallioperästä ja energiakaivojen lämpötila laskee. Lämpimällä säällä kylmäkoneikon täytyy jäähdyttää kylmäkalusteita enemmän ja rakennuksen lämmitykseen kuluu vähemmän energiaa. Silloin ylimääräistä lauhdelämpöä syntyy runsaasti. Kylmäainetta lauhdutetaan energiakaivojen avulla, joten lauhde-energia näkyy kaivojen lämpötilan nousuna. Ulkolämpötila vaikuttaa siis välillisesti energiakaivojen lämpötilaan. Siksi tässä tutkimuksessa on oleellista tarkastella ulkolämpötilaa osana energiakaivojen toimintaa.

Talven mittausjakson aikana ulkolämpötila vaihteli välillä $-32,6^{\circ}\text{C}$ ja $+1,6^{\circ}\text{C}$ ja lämpötilan keskiarvo oli $-15,3^{\circ}\text{C}$. Eri kaivoajojen (kahdella, kolmella ja neljällä kaivolla) välillä ulkolämpötilat vaihtelivat merkittävästi (Taulukko 2).

Taulukko 2. Ulkolämpötila talven mittausjaksolla

	Neljä kaivoa	Kolme kaivoa	Kaksi kaivoa	Koko jakso
Minimi ($^{\circ}\text{C}$)	-22,5	-29,8	-32,6	-32,6
Maksimi ($^{\circ}\text{C}$)	1,6	-12,0	-6,5	1,6
Keskiarvo ($^{\circ}\text{C}$)	-7,7	-21,1	-21,0	-15,3

Kahdella ja kolmella kaivolla ulkolämpötilat olivat lähempänä toisiaan, mutta neljällä kaivolla ulkolämpötilat olivat huomattavasti korkeampia. Kolmella kaivolla lämpötilojen vaihteluväli oli selvästi pienempi kuin kahdella ja neljällä kaivolla (Taulukko 2 ja Kuvio 7).



Kuvio 7. Ulkolämpötila talven mittausjaksolla

7.1.2 Energiakaivojen lämpötilaseuranta talven mittausjaksolla

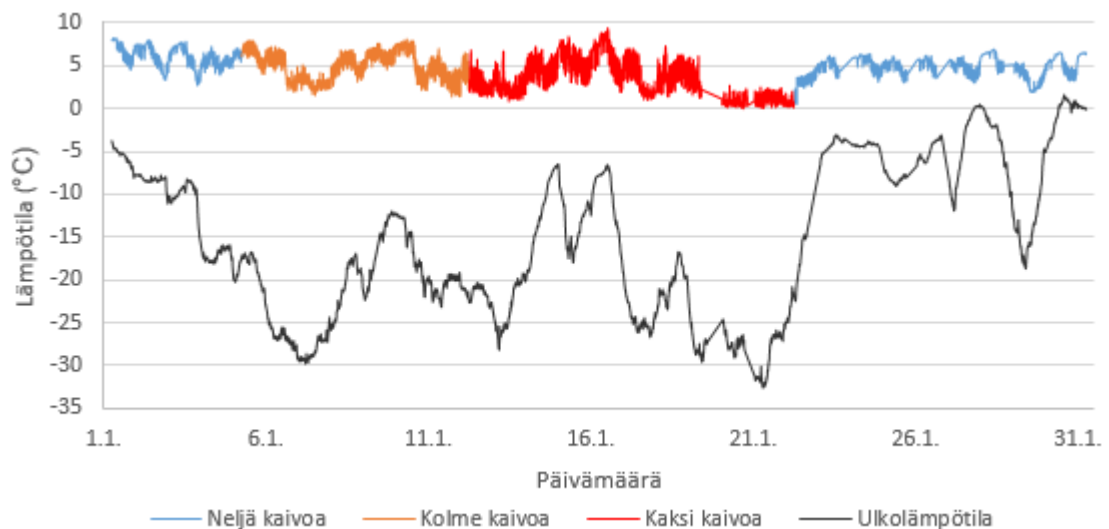
Ulkolämpötilan vaikutus näkyy kaivoihin menevän nesteen lämpötilassa koko mittausjakson ajan (Kuvio 8). Kaivoihin menevän nesteen lämpötila vaihtelee koko jakson ajan huomattavasti. Liuoksen lämpötilanvaihtelu johtuu kylmälaitoksen muuttuvista energiatarpeista. Energiakaivoja käytetään tarpeen mukaan sekä kylmäaineen lauhduttamiseen että lisälämmöntuotantoon. Kylmimpinä aikoina kaivoihin menevän liuoksen lämpötila on selvästi normaalia tasaisempi ja alhaisempi. Silloin lauhdelämpöä tulee huomattavasti rakennuksen lämmitystarvetta vähemmän ja siksi kaivoja käytetään pitkän aikaa pelkästään lisälämmöntuotantoon. Energiakaivoihin menevän liuoksen lämpötila tasaantuu ja laskee.



Kuvio 8. Kaivoihin menevän nesteen lämpötila ja ulkolämpötila tammikuussa. Värikäs viiva kuvaa nesteen lämpötilaa

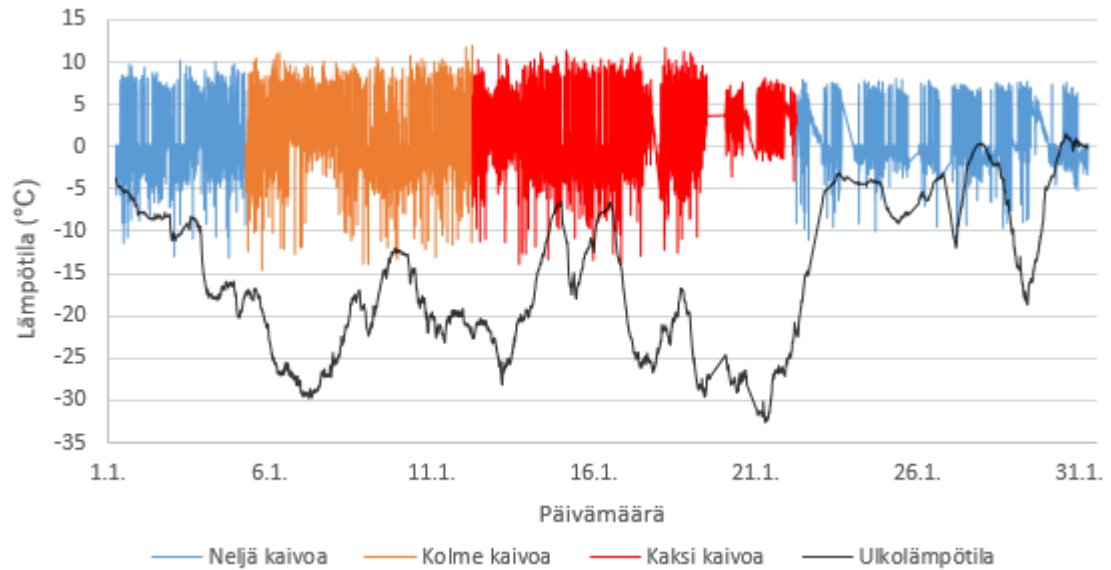
Myös eri kaivoajojen välillä on eroja (Kuvio 8). Neljällä ja kolmella kaivolla ajettaessa kaivoihin menevän liuoksen lämpötilanvaihtelu on pienempää kuin kahdella kaivolla. Kahdella kaivolla liuoksen lämpötila on tasainen vain kylmimpinä aikoina, mutta muulloin vaihtelua on selkeästi enemmän kuin neljällä kaivolla. Mittausten perusteella voidaan sanoa, että mitä useampi kaivo on käytössä, sitä vähemmän kaivoihin menevän keruuliuoksen lämpötila heittelee ja sitä toimintavarmempi järjestelmä on.

Kun kaivoihin menevän liuoksen lämpötilaa (Kuvio 8) verrataan kaivoista tulevan liuoksen lämpötilaan (Kuvio 9), nähdään, että liuoksen lämpötila tasaantuu kaivoissa huomattavasti eli keruuliuoksen lämpötilan vaihtelut ovat pienempiä. Ulkolämpötilan vaihtelu näkyy kaivoista tulevan liuoksen lämpötilassa koko mittausjakson ajan vielä selvemmin kuin kaivoihin menevän liuoksen lämpötilassa.



Kuvio 9. Kaivoista tulevan nesteen lämpötila ja ulkolämpötila tammikuussa. Väri-
käs viiva kuvaa nesteen lämpötilaa

Eri kaivoajot erottuvat kaivoista tulevan liuoksen lämpötilassa (Kuvio 9). Kaivoista tulevan liuoksen lämpötilassa näkyy sama ilmiö kuin kaivoihin menevän liuoksen lämpötilassa. Lämpötilan vaihtelu on neljällä kaivolla selkeästi vähäisempää kuin kolmella tai kahdella kaivolla. Mitä vähemmän kaivoja on käytössä, sitä epätasaisemmin ne toimivat. Liuoksen lämpötila ei kerkeä tasaantua kaivoissa, jos kaivoja ei ole käytössä tarpeeksi. Neljällä kaivolla ajettaessa kaivoista tulevan liuoksen lämpötilanvaihtelu on erittäin pientä, koska liuoksen lämpötila ehtii tasaantua kal-
lion vaikutuksesta hyvin.



Kuvio 10. Lämmönkeruunesteen lämpötilan muutos kaivoissa ja ulkolämpötila tammikuussa. Värikäs viiva kuvaa nesteen lämpötilan muutosta

Kun energiakaivoja käytetään lisälämmöntuotantoon, lämpötilan muutos kaivoissa on positiivinen. Lämpötilan muutos on negatiivinen, kun kylmääainetta lauhdutetaan kaivojen avulla ja lauhdelämpöä ladataan maahan. Kuviosta 10 huomataan, että kaivoja käytetään jatkuvasti sekä lisälämmöntuotantoon että lauhdutukseen. Vain kaikkein kylmimpinä aikoina kaivoja käytetään lähes pelkästään lisälämmöntuotantoon. Liuoksen lämpötilan muutoksen arvot vaihtelevat koko mittausjakson ajan, mutta eri kaivoajojen välillä niissä ei ole kovin merkittäviä eroja (Kuvio 10). Kaivojen lukumäärän pienentyessä liuoksen lämpötilan muutos näyttää kasvavan hieman. Sama käy ilmi myös taulukosta 3.

Taulukko 3. Maaliuoksen lämpötilan muutoksen keskiarvo (°C) kaivoissa talven mittausjaksolla. Yhteensä-rivillä on lämpötilan muutoksen itseisarvon keskiarvo

	Neljä kaivoa	Kolme kaivoa	Kaksi kaivoa	Koko jakso
Lauhdutus	-1,5	-2,4	-2,5	-2,0
Maalämpö	3,1	3,2	3,7	3,4
Yhteensä	2,3	2,9	3,3	2,8

Liuoksen lämpötilan muutoksen kasvu kaivojen lukumäärän vähentyessä johtuu siitä, että kaivojen lämpötila laskee, kun käytössä olevia kaivoja vähennetään

(Taulukko 4). Kaivojen lämpötilan lasku puolestaan johtuu siitä, että kahdella kaivolla tarvittava lämpöenergia otetaan liian pieneltä alueelta eli kalliota ylikuormitetaan ja kallion lämpötila keruuputkiston ympärillä laskee alle kallion luontaisen lämpötilan (4°C). Jos laitosta ajettaisiin pitkään kahdella kaivolla, kallion lämpöpotentiaali ei riittäisi lämmittämään keruunestettä tarpeeksi ja laitoksen toiminta häiriintyisi. Laitos voisi kuitenkin toimia, jos apuna käytettäisiin olemassa olevia sähkövastuksia, mutta taloudellinen kannattavuus pitäisi tällöin arvioida erikseen.

Kolmella ja neljällä kaivolla ajettaessa lämpötiloissa ei ole merkittävää eroa. Kolmella kaivolla järjestelmä todennäköisesti toimisi vielä lähes normaalisti. Tämän perusteella voidaan todeta, että energiakaivot on mitoitettu oikein. Koska järjestelmä näyttää toimivan hyvin kolmellakin kaivolla, voitaisiin mitoituksessa käytettävää varmuuskerrointa tulevaisuudessa pienentää.

Taulukko 4. Käytössä olevien kaivojen lukumäärän vaikutus maaliuoksen keskilämpötiloihin (°C) talven mittausjaksolla

		Neljä kaivoa	Kolme kaivoa	Kaksi kaivoa	Koko jakso
Kaivoihin menevä lämpötila	Lauhdutus	7,2	7,9	6,9	7,3
	Maalämpö	1,8	1,4	-0,9	0,6
	Yhteensä	4,5	4,0	1,8	3,5
Kaivoista tuleva lämpötila	Lauhdutus	5,6	5,4	4,4	5,3
	Maalämpö	4,8	4,6	2,8	4,0
	Yhteensä	5,2	4,9	3,4	4,6

Talven mittausjakson aikana energiakaivoja käytettiin lisälämmöntuotantoon yhteensä noin 17 vuorokautta ja lauhdelämpöä ladattiin maahan 13 vuorokauden ajan. Neljällä kaivolla järjestelmää käytettiin lisälämmöntuotantoon ja lauhdutukseen lähes yhtä paljon, mutta kolmella ja kahdella kaivolla reilusti enemmän lisälämmöntuotantoon. Tämä selittyy pitkälti sillä, että neljällä kaivolla ajettaessa ulkolämpötila oli korkeampi kuin kahdella ja kolmella kaivolla. Kahdella kaivolla lisälämmöntuotannon osuus oli suurempi kuin kolmella kaivolla, sillä kahdella kaivolla liuoksen keskilämpötila oli selvästi alhaisempi kolmeen kaivoon verrattuna (Taulukko 4). Alhainen liuoksen lämpötila heikentää maalämpölämmönvaihtimen tehoa ja siksi lisälämmöntuotantoon kuluu enemmän aikaa. Myymälän sisälämpötila pysyi sopivana koko mittausjakson ajan.

7.2 Kevään mittaukset

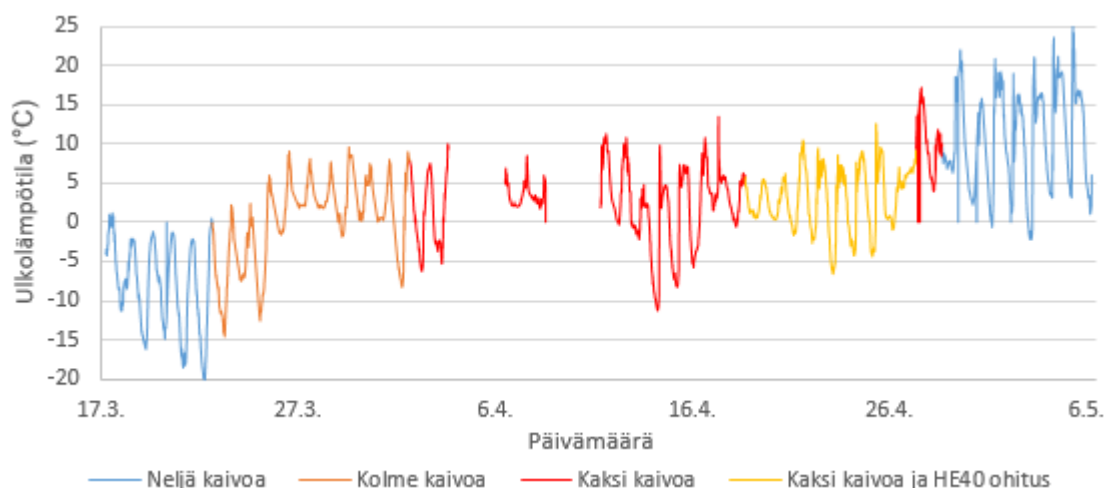
7.2.1 Ulkolämpötila kevään mittausjaksolla

Kevään mittausjaksolla ulkolämpötilan vaihtelu oli suurempaa kuin talvella. Keväällä ulkolämpötila vaihteli välillä $-20,3^{\circ}\text{C}$ ja $+25,2^{\circ}\text{C}$ ja lämpötilan keskiarvo oli $+2,4^{\circ}\text{C}$. Eri kaivoajojen välillä ulkolämpötilat vaihtelivat selvästi (Taulukko 5).

Taulukko 5. Ulkolämpötila kevään mittausjaksolla

	Neljä kaivoa	Kolme kaivoa	Kaksi kaivoa	Kaksi kaivoa ja HE40 ohitus	Koko jakso
Minimi ($^{\circ}\text{C}$)	-20,3	-14,6	-11,3	-6,6	-20,3
Maksimi ($^{\circ}\text{C}$)	25,2	9,6	17,2	12,6	25,2
Keskiarvo ($^{\circ}\text{C}$)	3,0	0,3	3,0	3,0	2,4

Neljällä kaivolla lämpötilan vaihteluväli oli suurin. Mittausjakson alussa ulkolämpötila oli huomattavan matala ja mittausjakson lopussa korkea. Muilla kaivoajoilla lämpötilan vaihteluvälit olivat lähempänä toisiaan. Kolmella kaivolla keskilämpötila oli alhaisempi kuin muilla kaivoajoilla. Kahdella kaivolla keskilämpötila on sama kuin neljällä kaivolla, mutta vaihteluväli pienempi. (Taulukko 5 ja Kuvio 11.)

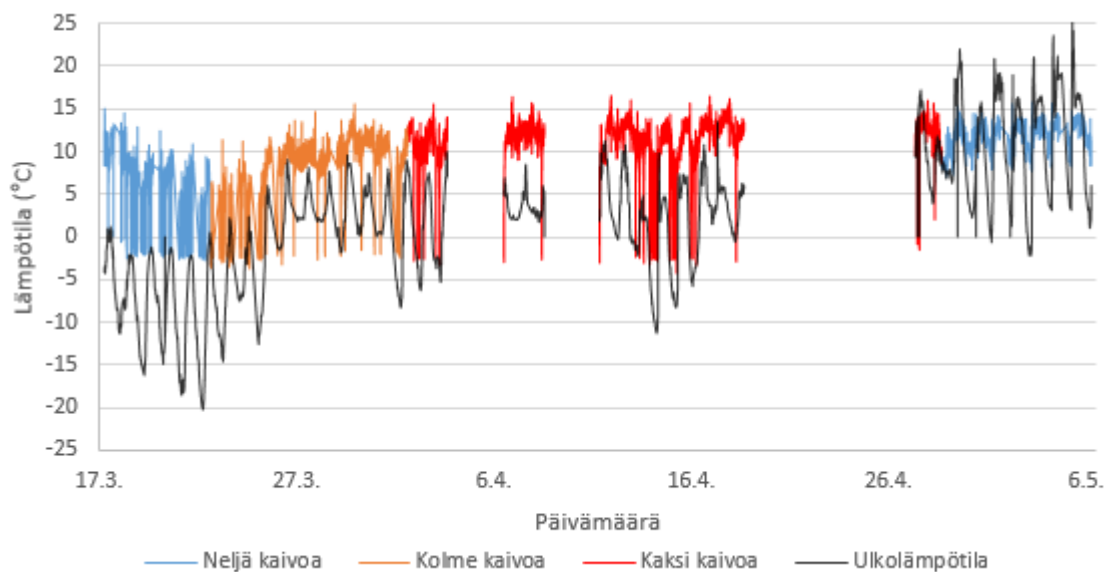


Kuvio 11. Ulkolämpötila kevään mittausjaksolla

7.2.2 Energiakaivojen lämpötilaseuranta kevään mittausjaksolla

Ulkolämpötilan vaikutus näkyy myös keväällä kaivoihin menevän nesteen lämpötilassa koko mittausjakson ajan (Kuvio 12). Kaivoihin menevän nesteen lämpötila

vaihtelee koko jakson ajan huomattavasti, sillä kylmälaitoksen energiatarpeet muuttuvat jatkuvasti. Energiakaivoja käytetään tarpeen mukaan sekä kylmäaineen lauhduttamiseen että lisälämmöntuotantoon. Keväällä kaivoihin menevän liuoksen lämpötilan heittely on pienimmillään lämpimimpinä aikoina päinvastoin kuin talvella. Tämä johtuu siitä, että kevään lämpiminä aikoina lauhdelämpöä tulee yli rakennuksen lämmitystarpeen ja kaivoja käytetään yhtäjaksoisesti pitkän aikaa lauhduttamiseen eikä lisälämmöntuotantoa tarvita. Silloin liuoksen lämpötila tasoittuu ja nousee korkeimmilleen. Erityisen hyvin tämä näkyy mittausjakson lopussa, kun ulkolämpötila on huomattavan korkea.

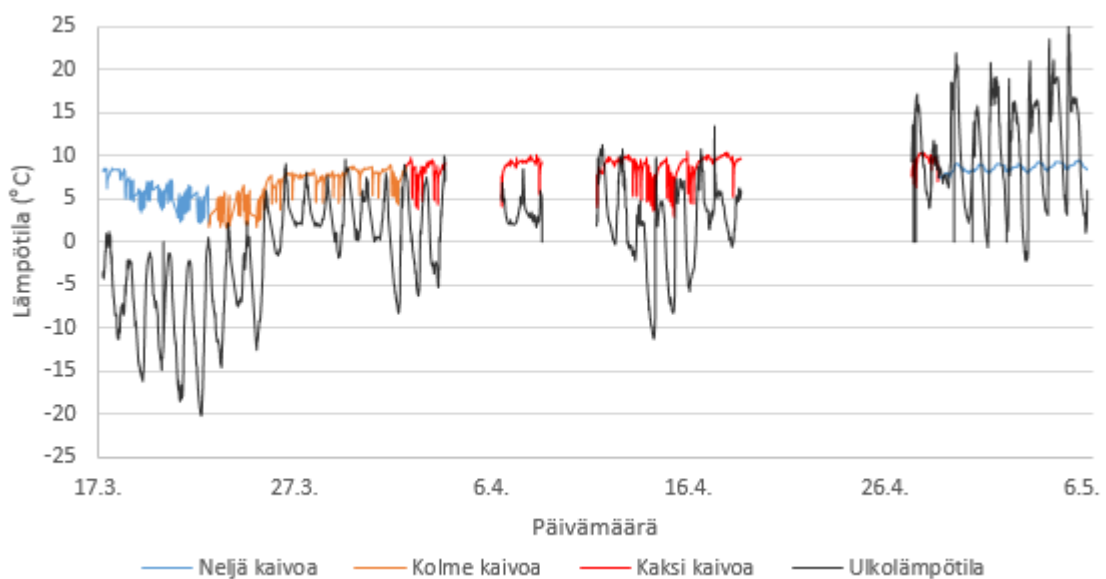


Kuvio 12. Kaivoihin menevän nesteen lämpötila ja ulkolämpötila kevään mittausjaksolla. Värikäs viiva kuvaa nesteen lämpötilaa. Viimeisen aukon kohdalla keikeltiin HE40-lämmönvaihtimen ohitusta

Keväällä eri kaivoajojen välillä on samansuuntaisia eroja kuin talvella (Kuvio 8 ja Kuvio 12), mutta erot eivät ole aivan niin selkeitä. Neljällä ja kolmella kaivolla ajettaessa kaivoihin menevän liuoksen lämpötilanvaihtelu on pienempää kuin kahdella kaivolla. Erityisesti mittausjakson lopussa neljällä kaivolla kaivoihin menevän liuoksen lämpötila on tasainen. Kahdella ja kolmella kaivolla liuoksen lämpötila on tasainen lämpimimpinä aikoina, mutta muulloin vaihtelua on enemmän kuin neljällä kaivolla. Mitä useampi kaivo on käytössä, sitä vähemmän kaivoihin menevän keruuliuoksen lämpötila heittelee ja sitä toimintavarmempi järjestelmä on. Kevään mittausjaksolla ulkolämpötilan vaihtelu vaikuttaa liuoksen lämpötilaan

merkittävästi, koska järjestelmää käytetään koko ajan vuorotellen lauhdutukseen ja lisälämmöntuotantoon. Mittaustuloksista olisi tullut selkeämpiä, jos ulkolämpötilat olisivat vaihdelleet vähemmän mittausjakson aikana.

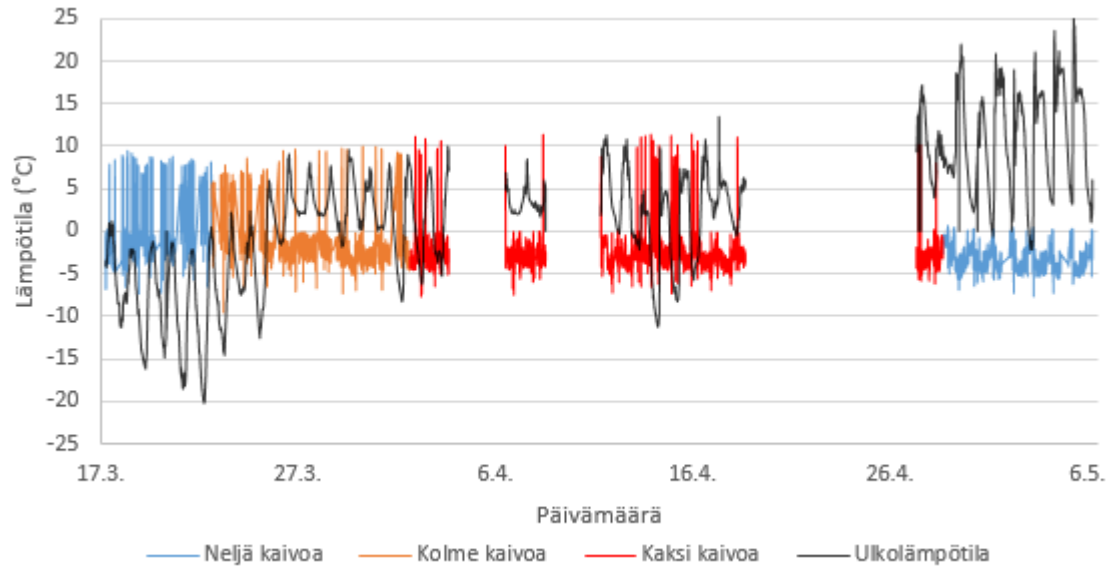
Kun kaivoihin menevän liuoksen lämpötilaa (Kuvio 12) verrataan kaivoista tulevan liuoksen lämpötilaan (Kuvio 13), nähdään, että liuoksen lämpötila tasaantuu huomattavasti kaivoissa eli keruuliuoksen lämpötilan vaihtelut ovat pienempiä. Vastaava ilmiö havaittiin myös talven mittausjaksolla. Ulkolämpötilan vaihtelu näkyy kaivoista tulevan liuoksen lämpötilassa koko mittausjakson ajan.



Kuvio 13. Kaivoista tulevan nesteen lämpötila ja ulkolämpötila kevään mittausjaksolla. Värikäs viiva kuvaa nesteen lämpötilaa

Eri kaivoajat erottuvat kaivoista tulevan liuoksen lämpötilassa (Kuvio 13). Kaivoista tulevan liuoksen lämpötilassa näkyy sama ilmiö kuin kaivoihin menevän liuoksen lämpötilassa. Liuoksen lämpötilan vaihtelu on neljällä kaivolla vähäisempää kuin kolmella tai kahdella kaivolla. Mitä vähemmän kaivoja on käytössä, sitä epätasaisemmin ne toimivat, kuten talvellakin.

Keväällä kaivoja käytetään enimmäkseen lauhdutukseen, mutta ajoittain myös lisälämmöntuotantoon (Kuvio 14). Lisälämmöntuotanto painottuu jakson alkuun neljällä ja kolmella kaivolla ajettaessa. Kahdella kaivolla kaivoja käytetään lähes pelkästään lauhdutukseen. Myös jakson lopun lämpimällä jaksolla kaivoja käytetään vain lauhdutukseen.



Kuvio 14. Keruuliuksen lämpötilan muutos kaivoissa ja ulkolämpötila keväällä. Värikäs viiva kuvaa nesteen lämpötilan muutosta

Kaivojen lukumäärän pienentyessä liuoksen lämpötilan muutos näyttää kasvavan hieman varsinkin lisälämmitystarpeen aikana. Lämpötilan muutos on huomattavasti suurempi lisälämmöntuotannolla kuin lauhdutuksella (Kuvio 14 ja Taulukko 6). Tämä johtuu siitä, että kaivoihin menevän liuoksen ja kallioperän lämpötilaero on selvästi suurempi lisälämmitysvaiheessa kuin lauhdutusvaiheessa. Siksi lämpötilan muutos tapahtuu nopeammin lisälämmitysvaiheessa.

Mittausjakson alussa neljällä kaivolla ajettaessa kaivoja käytetään paljon lisälämmöntuotantoon, joten kallioperän lämpötila ei ole kovin korkea. Tämän takia lisälämmöntuotannossa lämpötilan muutos on pienempi kuin kahdella kaivolla. Kahdella kaivolla ajettaessa kaivoja käytetään enimmäkseen lauhduttamiseen, jonka seurauksena kallioperän lämpötila on normaalia korkeampi. Kun kaivoja käytetään vain ajoittain lisälämmöntuotantoon, saadaan kalliosta paljon lämpötehoa. (Kuvio 14, Taulukko 6 ja Taulukko 7.)

Taulukko 6. Maaliuoksen lämpötilan muutoksen keskiarvo (°C) kaivoissa kevään mittausjaksolla. Yhteensä-rivillä on lämpötilan muutoksen itseisarvon keskiarvo

	Neljä kaivoa	Kolme kaivoa	Kaksi kaivoa	Koko jakso
Lauhdutus	-2,7	-1,9	-2,7	-2,1
Maalämpö	4,1	3,8	7,1	4,3
Yhteensä	2,9	2,3	2,9	2,3

Kevään mittausjaksolla kaivoja käytetään enimmäkseen lauhdutukseen. Mitä vähemmän kaivoja on käytössä, sitä korkeammaksi kaivojen lämpötila nousee (Taulukko 7). Tämä johtuu siitä, että kahdella kaivolla lämpöä siirretään pienemmälle alueelle kallioperässä, joten kallioperän lämpötila nousee eikä lauhdutus-teho pysy niin korkealla kuin käytettäessä useampaa kaivoa. Tilanne on siis päinvastainen kuin talvella, jolloin kaivojen pienempi määrä jäähdytti kalliota eikä lisälämpöpotentiaali riittänyt. Kolmella kaivolla ulkolämpötila oli alhaisempi, mikä vääristää mittaustulosta.

Taulukko 7. Käytössä olevien kaivojen lukumäärän vaikutus maaliuoksen keskilämpötiloihin (°C) kevään mittausjaksolla

		Neljä kaivoa	Kolme kaivoa	Kaksi kaivoa	Koko jakso
Kaivoihin menevä lämpötila	Lauhdutus	10,6	9,0	11,7	10,1
	Maalämpö	1,1	1,0	0,4	1,0
	Yhteensä	9,4	7,2	11,2	9,2
Kaivoista tuleva lämpötila	Lauhdutus	7,8	7,1	8,9	8,0
	Maalämpö	5,2	4,8	7,5	5,3
	Yhteensä	7,5	6,6	8,9	7,7

Kevään mittausjakson aikana energiakaivoja käytettiin lisälämmöntuotantoon yhteensä vain hieman yli neljän vuorokauden ajan ja lauhdelämpöä ladattiin maahan noin 40 vuorokauden ajan. Neljällä kaivolla järjestelmää käytettiin lisälämmöntuotantoon noin puolentoista vuorokauden ajan ja lauhdutukseen yli 11 vuorokauden ajan. Kolmella kaivolla järjestelmää käytettiin lisälämmöntuotantoon enemmän kuin muilla ajoilla, noin kahden vuorokauden ajan, ja lauhdutukseen hieman yli viikon. Kahdella kaivolla järjestelmää käytettiin lähes pelkästään lauhdutukseen. Myymälän sisälämpötila pysyi sopivana koko mittausjakson ajan, mutta se vaihteli hieman ulkolämpötilan mukaan.

7.2.3 HE40-lämmönvaihtimen ohitus

Tutkittavassa kylmälaitoksessa on kaksi lämmönvaihdinta, joiden kautta lauhdelämpöä siirretään energiakaivoihin. Ne ovat lämmönvaihtimet HE40 ja HE50. HE50-lämmönvaihtimen teho on hyvin pieni, joten HE40-lämmönvaihtimen kytkeminen pois käytöstä tarkoittaa sitä, etteivät kaivot ole juuri ollenkaan käytössä.

Tämä näkyy selvästi kuviosta 15. Kun HE40-lämmönvaihdin otettiin pois käytöstä, energiakaivojen lämpötila laski nopeasti noin 8 °C:seen. Tämän jälkeen kaivojen lämpötilan lasku jatkui hitaasti kohti kallion normaalia lämpötilaa. Kallion korkea lämpötila johtuu siitä, että kallioon on ladattu lauhde-energiaa.



Kuvio 15. HE40-lämmönvaihtimen ohituksen vaikutus keruuliuoksen lämpötilaan

Kuviosta 16 nähdään, että keruuliuoksen lämpötila muuttui kaivoissa selvästi, kun HE40-lämmönvaihdin oli käytössä. Kun vaihdin kytkettiin pois, lämpötilan muutos kaivoissa pieneni lähes nollaan. Tämäkin osoittaa, että kaivot olivat lähes kokonaan pois käytöstä. Lämpötilan epätasainen laskeminen ohituksen aikana (Kuvio 15) ja lämpötilan muutokset (Kuvio 16) johtuvat HE50- ja HE60-lämmönvaihdinten vaikutuksista kaivoihin. HE60 on järjestelmän ainoa lämmönvaihdin, jolla tuotetaan lisälämpöä. HE40-vaihtimen ohituksen aikana se oli käytössä kolme kertaa. Vaihtimen toiminta näkyy piikkeinä kuvioissa 15 ja 16.



Kuvio 16. HE40-lämmönvaihtimen ohituksen vaikutus keruuliuksen lämpötilan muutokseen kaivoissa

7.3 Kesän mittaukset

7.3.1 Ulkolämpötila kesän mittausjaksolla

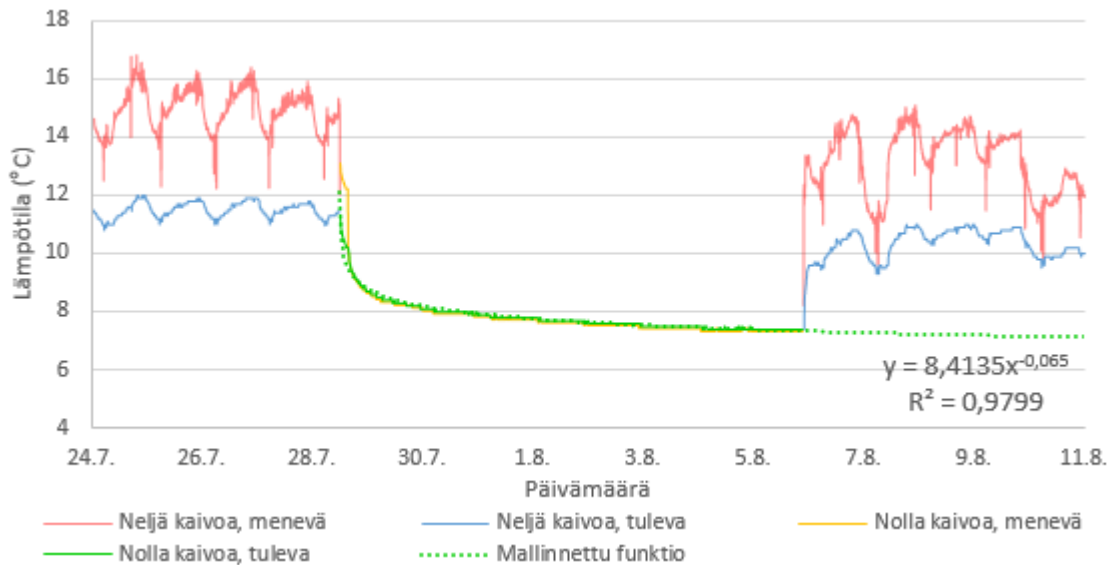
Kesän mittaukset aloitettiin, kun ulkolämpötila ja samalla kallioperän lämpötila olivat mahdollisimman korkeita. Ulkolämpötila vaihteli välillä $+8,7^{\circ}\text{C}$ ja $+35,1^{\circ}\text{C}$ ja lämpötilan keskiarvo oli $+19,6^{\circ}\text{C}$ (Taulukko 8). Kesän mittausjaksolla ulkolämpötilan vaihtelulla ei ole niin suurta merkitystä kuin aikaisemmilla jaksoilla. Tärkeintä oli, että kallioperän lämpötila oli mahdollisimman korkealla mittausten alussa. Kuumalla jaksolla kallion lämpötila on korkea, koska kylmälaitos tarvitsee paljon lauhdutustehoa ja lämpöä ladataan maahan. Kun kaivot poistetaan käytöstä, ulkolämpötila ei vaikuta kallioperän jäähtymiseen juuri ollenkaan. Ulkolämpötila pysyi kuitenkin lähes samanlaisena koko mittausten ajan (Taulukko 8).

Taulukko 8. Ulkolämpötila kesän mittausjaksolla

	Neljä kaivoa	Nolla kaivoa	Koko jakso
Minimi ($^{\circ}\text{C}$)	10,0	8,7	8,7
Maksimi ($^{\circ}\text{C}$)	35,1	33,2	35,1
Keskiarvo ($^{\circ}\text{C}$)	20,0	19,0	19,6

7.3.2 Lauhdelämmön säilyminen kallioperässä

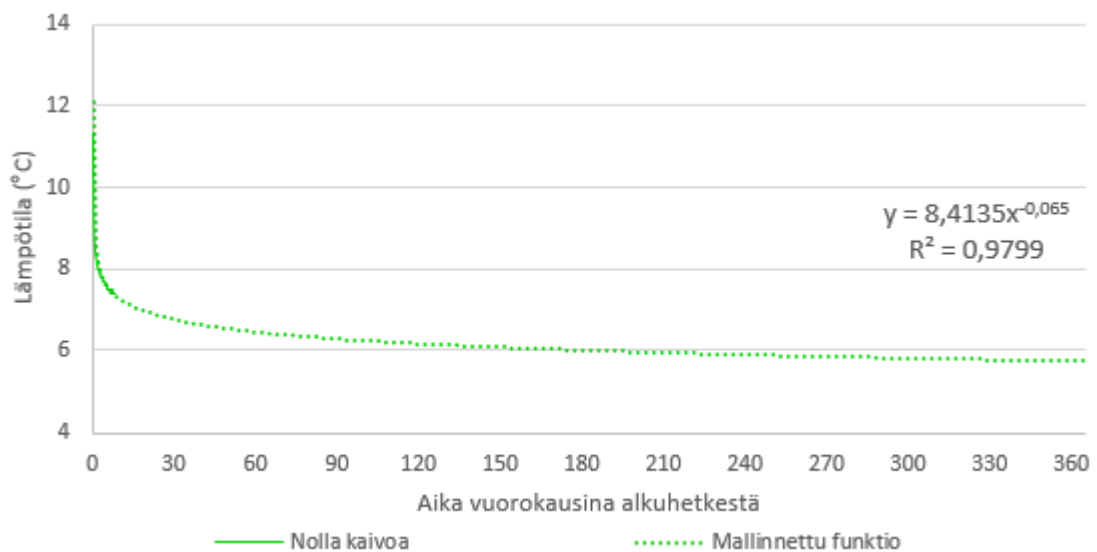
Mittausjakson alussa kaivojen ollessa käytössä kaivoihin menevän liuoksen lämpötila oli noin 12-17°C ja kaivoista tulevan liuoksen lämpötila noin 11-12 °C. Kun kaivot poistettiin käytöstä, menevän ja tulevan nesteen lämpötilojen välillä ei ollut enää merkittävää eroa ja liuoksen lämpötila laski nopeasti noin 9°C:seen. Tämän jälkeen lämpötilan lasku hidastui huomattavasti. (Kuvio 17.) Siksi voidaan olettaa, että kallioperän lämpötila oli noin 9°C, kun kaivot poistettiin käytöstä. Rovaniemellä kallioperän lämpötila sadan metrin syvyydessä on normaalisti noin 4°C. Lauhde-energian lataamisella on siis huomattava vaikutus kallioperän lämpötilaan.



Kuvio 17. Kaivoihin menevän ja kaivoista tulevan nesteen lämpötila kesän mittausjaksolla. Mallinnettu funktio kuvaa lämpötilan kehitystä, mikäli kaivoja ei olisi otettu käyttöön

Kun kaivot otettiin takaisin käyttöön, kaivoihin menevän liuoksen lämpötila nousi noin 10-15°C:seen ja kaivoista tulevan liuoksen lämpötila 10°C tuntumaan. Liuoksen lämpötila mittausjakson lopussa oli hieman matalampi kuin jakson alussa, koska kallioperän lämpötila oli laskenut mittausten aikana. Myös ulkolämpötila oli jakson lopussa alempana kuin jakson alussa eikä kylmälaitos siksi tarvinnut enää niin paljon lauhdutustehoa. (Kuvio 17.)

Lauhdelämmön säilymisen mallinnuksen pohjana käytettiin kaivoista tulevan liuoksen lämpötilaa. Se kuvaa parhaiten kallioperän lämpötilaa, koska liuoksen lämpötila tasoittuu kaivoissa kohti kallioperän lämpötilaa. Mallintamalla saatiin selville, että kallioperän jäähtyminen seuraa potenssifunktion muotoa eli jäähtyminen hidastuu ajan kuluessa (Kuvio 18). Jäähtyminen ei ole lineaarista, koska keruuputkiston läheisyyden lämpötilan ja kallioperän normaalin lämpötilan välinen ero pienenee koko ajan, joten diffuusio hidastuu jatkuvasti.



Kuvio 18. Lämpötilan kehitys kallioperässä mallinnettuna, jos kaivot olisi poistettu käytöstä kokonaan

Lämmön säilymistä kallioperässä kuvaavan mallin funktio on:

$$y = 8,4135x^{-0,065} \quad (2)$$

missä

y	on	Kaivoista tulevan liuoksen lämpötila (°C)
x	on	Aika vuorokausina

Jäähtymistä kuvaavan mallin selitysaste on 98% eli malli on erittäin luotettava. Funktion avulla voidaan laskea, kuinka pitkään lauhdelämpö säilyy kallioperässä mittaushetkeä vastaavissa olosuhteissa. Taulukossa 9 on esitetty lauhdelämmön säilyminen kallioperässä. Mallin mukaan lämpö säilyy kallioperässä moninkertaisesti etukäteisolettamusta pidempään. Kallioperän lämpötilan laskeminen 4°C:seen kestäisi yli 250 vuotta.

Taulukko 9. Kallioperän jäähtyminen mallinnetulla funktiolla ($y = 8,4135x^{-0,065}$, jossa y =lämpötila ja x =aika) laskettuna. Kallioperän lämpötila alussa noin 9 °C

Jäähtymiseen kuluva aika	Saavutettu lämpötila (°C)
14 vrk	7,09
1 kk	6,74
2 kk	6,45
6 kk	6,00
1 vuosi	5,73
2 vuotta	5,48
5 vuotta	5,16
10 vuotta	4,94
100 vuotta	4,25

Matemaattisessa mallinnuksessa on huomioitava, että tulos on paikkansapitävä vain niissä olosuhteissa, joissa mallinnuksen taustalla olevat mittaukset on tehty. Todellisuudessa mallinnuksen paikkansapitävyyttä voisivat heikentää esimerkiksi pohjaveden virtauksen muutokset kallioperässä. Lisäksi kallion rakenne ja kiviaine vaikuttavat tulokseen, joten tätä mallinnusta ei voida soveltaa sellaiseen muissa olosuhteissa oleviin energiakaivoihin. Myös maalämmön hyödyntäminen vähentää lämmön säilymistä kallioperässä.

8 POHDINTA

Nykyään ympäristöystävällisyyden ja energiatehokkuuden merkitys on korostunut, joten uusien innovatiivisten energiaratkaisuiden kehittäminen on erittäin ajankohtaista ja tärkeää. Tutkimuksen kohteena olevassa kylmälaitoksessa energiakaivoja hyödynnetään monipuolisesti osana kylmäkoneikkoa. Usein kylmälaitteet lauhdutetaan suoraa ulkoilmaan, mutta tässä laitoksessa energiatehokkuutta on parannettu käyttämällä energiakaivoja lauhdenieluina. Lauhde-energian lataaminen maahan tehostaa lauhdutusta ja parantaa maalämpöpotentiaalia.

Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli selvittää energiakaivojen lukumäärän vaikutusta kaivojen lämpötilatasoihin ja toimintaan sekä energiakaivojen mitoitusarvon paikkansapitävyyttä. Lisäksi tutkittiin lauhdelämmön lataamista maahan ja lämmön säilymistä kallioperässä. Kaikkiin tutkimustavoitteisiin saatiin vastauksia ja etenkin lauhdelämmön lataamista koskevat tulokset ovat erittäin lupaavia.

Tulosten perusteella kylmälaitokseen liitettyjen energiakaivojen lukumäärä vaikuttaa kaivojen lämpötilatasoihin ja toimintaan. Kahdella kaivolla kallioperää ylikuormitetaan eikä energiakaivojen teho riitä laitoksen tarpeisiin kovin pitkäksi aikaa. Talven aikana kallioperän lämpötila kaivojen ympärillä laskee selvästi kallion normaalia lämpötilaa alhaisemmaksi, jolloin maalämpöteho huononee. Vastavasti keväällä kallion lämpötila nousee normaalia korkeammaksi, jolloin lauhdutusteho heikkenee.

Kolmella kaivolla edellistä ylikuormitusta ei enää havaita, vaan järjestelmän mitoitus on riittävä sekä lisälämmöntuotannon että lauhdutuksen kannalta. Tulevaisuudessa mitoituksessa käytettävää varmuuskerrointa voidaan pienentää, koska kolmellakin kaivolla järjestelmä näyttää toimivan hyvin. Pitkinä kylminä jaksoina jouduttaisiin kuitenkin mahdollisesti turvautumaan sähkövastuksiin lisälämmöntuotannossa. Neljällä kaivolla sähkövastuksia ei ole jouduttu käyttämään koskaan. Lisäksi neljällä kaivolla toteutettu järjestelmä toimii hieman tasaisemmin kuin kolmen kaivon järjestelmä. Toiminnan tasaisuutta voisi parantaa myös sillä, että HE60-lämmönvaihtimeen lisättäisiin taajuusmuuntajaohjaus, jolloin sitä voitaisiin ajaa lineaarisesti. Nyt vaihdin toimii joko täydellä teholla tai ei ollenkaan.

Kaivojen toimintaan voi vaikuttaa se, että kaivot sijaitsevat vain 10 metrin päässä toisistaan. Monissa lähteissä sanotaan, että kaivojen tulisi sijaita vähintään 15 metrin päässä toisistaan, jotta niiden koko teho saataisiin hyödynnettyä. Järjestelmä saattaisi toimia kahdellakin kaivolla paremmin, jos kaivot olisivat kauempana toisistaan.

Lauhde-energian lataaminen maahan osoittautui oletettua kannattavammaksi. Kallioperän lämpötila säilyy energiakaivojen ympärillä kallion normaalia lämpötilaa korkeampana vuosia. Jo asteenkin korkeampi kallioperän lämpötila parantaa maalämmön hyötysuhdetta. Koska kalliota voidaan kesäisin ladata lisää, maalämpöpotentiaali pysyy jatkuvasti korkeana. Siitä huolimatta energiakaivojen lauhdutusteho säilyy parempana kuin ilmaan lauhdutettaessa. Järjestelmä on siis kannattava ja toimiva.

Kaivojen lukumäärän vaikutuksia tutkimista tuloksista olisi saatu luotettavampia, jos mittausjaksot olisivat olleet pidempiä. Silloin eri kaivoajojen ulkolämpötilat olisivat todennäköisesti poikenneet toisistaan vähemmän ja näin ulkolämpötilan vaikutus mittauksiin olisi pienentynyt ja kaivojen lukumäärän vaikutuksen tulkitseminen olisi ollut yksiselitteisempää. Erityisesti kevään mittausjakson tulosten tulkittaa olisi helpottanut, jos ulkolämpötilat olisivat poikenneet eri kaivoajojen välillä vähemmän toisistaan. Ulkolämpötilan vaikutuksista huolimatta aineistoista löytyi eroja eri kaivoajojen välillä.

Lauhde-energian säilymistä kannattaisi tutkia jatkossa myös muissa olosuhteissa, jotta saataisiin kattavampaa tutkimustietoa lataamisen kannattavuudesta. Tämän tutkimuksen perusteella lauhdelämmön lataaminen maahan on kannattavaa ja sitä kannattaisi hyödyntää laajemmin kylmälaitteistojen yhteydessä.

Lauhdelämmön lataamisen mahdollisuudet ovat erittäin laajat. Kyseistä tekniikka voitaisiin käyttää myös muissa kohteissa, joissa tarvitaan sekä kylmää että lämmintä. Tällaisia kohteita ovat myymälöiden ohella esimerkiksi jäähallit, uimahallit ja sairaalat.

Sain kimmokkeen opinnäytetyöhöni opintoihini sisältyneeltä Lämpöpumput ja kylmätekniikka -kurssilta. Toimeksiantajani Jetitek Oy tarjosi minulle mielenkiintoisen aiheen ja hyvän tutkimusaineiston. Tutkimusprosessi oli erittäin opettavainen

ja yllättävän työläs. Opinnäytetyön tekeminen töiden ohella hidasti työn valmistumista. Käsitellessäni suurta datamäärää opin käyttämään Exceliä sujuvasti ja samalla tietämykseni maalämmöstä ja kylmäteknikasta syventyi.

LÄHTEET

- Aalto, E. 2008. Luonnolliset kylmäaineet – uusi askel ilmakehänsuojelussa kylmäalalla. Suomen Kylmäliikkeiden Liitto ry.
- Aittomäki, A. 2012. Kylmätekniikka. 4. painos. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys Ry.
- Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. 2013. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).
- Dixit, S., Crain, J., Poon, W.C.K., Finney, J.L. & Soper, A.K. 2002. Molecular segregation observed in a concentrated alcohol-water solution. *Nature* Vol. 416, 829–832.
- Espo, P. 2014. Pienen myymälän hiilidioksidikylmän lämmöntalteenotto. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö.
- Huusko, A. 2016. Geologian tutkimuskeskus kartoittaa Suomen geoenergiapotentiaalia. *Positio* 1/2016, 12–15.
- Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo, Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. 1. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Karppinen, E. 2016. Euroopan unionin kylmäainelainsäädännön vaikutukset pienen kokoluokan markettien kylmäntuoton teknisiin sovellutuksiin ja energiatehokkuuteen. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö ja energiatekniikka. Diplomityö.
- Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2006. Kylmätekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.
- Kortesoja, P. 2015. Kylmälaitosten lauhdutuslämmön talteenotto ja hyödyntäminen. Thermopolis Oy. Raportti osana Versatile Materials -hanketta.
- Leppäharju, N. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Oulun yliopisto. Geofysiikka. Pro gradu -tutkielma.
- Manner, K. 2013. Hiilidioksidikylmälaitoksen ja maalämpöjärjestelmän optimointi liikennemyymäläkiinteistössä. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö ja energiatekniikka. Diplomityö.
- Motiva, 2012. Kaupan kylmälaitteiden ja -järjestelmien lauhdelämmön talteenotto. Viitattu 21.3.2017 http://www.motiva.fi/files/7973/Kaupan_kylmalaitteiden_ja_jarjestelmien_lauhdelammon_talteenotto_Laskentaohje.pdf.
- Mäkitalo, M. 2015. Hiilidioksidikylmäjärjestelmän energiaseuranta ja toiminnan kehittäminen lähikaupassa. Lapin AMK. Rakennustekniikka. Opinnäytetyö.
- Peltola, A. 2011. Sairaalarakennuksen maalämpöpumppujärjestelmän valinta. Metropolia ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Peltola, T. 2013. Hiilidioksidia kylmäaineena käyttävien markettien lämmitys. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Sarkar, J. 2010. Review on Cycle Modifications of Transcritical CO₂ Refrigeration and Heat Pump System. Journal of Advanced Research in Mechanical Engineering Vol. 1-2010, 22–29.